



ANÁLISE DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA DE ÍMÃ PERMANENTE COM TENSÃO NÃO SENOIDAL

Rafael de Carvalho Caetano

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Antônio Carlos Ferreira, Ph.D.

Rio de Janeiro
Dezembro de 2013

ANÁLISE DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA DE ÍMÃ PERMANENTE COM TENSÃO NÃO SENOIDAL

Rafael de Carvalho Caetano

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DE GRAU DE
ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovada por:

Prof. Antônio Carlos Ferreira, Ph.D
(Orientador)

Prof. Richard Magdalena Stephan, D.Ing.

Prof. Sérgio Sami Hazan, Ph.D

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
DEZEMBRO DE 2013

Caetano, Rafael de Carvalho.

ANÁLISE DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA DE ÍMÃ
PERMANENTE COM TENSÃO NÃO SENOIDAL
Rafael de Carvalho Caetano – Rio de Janeiro:
UFRJ/ESCOLA POLITÉCNICA, 2013.

XIII, 76 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Antônio Carlos Ferreira, Ph.D

Projeto de Graduação – UFRJ/ POLI/ Engenharia
Elétrica, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 64.

Agradecimentos

A Deus, revelado na pessoa de Jesus Cristo, em quem tudo existe. Pai e amigo presente em todos os momentos.

Aos meus pais Oreto e Raquel, pelo amor e apoio incondicionais.

A minha noiva Talita, pela paciência e suporte em todos os momentos.

Ao professor Antônio Carlos Ferreira, pela dedicação, paciência e solicitude dedicados a esse projeto desde o início.

Aos grandes amigos feitos no decorrer destes anos, Bruno, Eduardo, Felipe, Rafael, Teo, Thais e Tiago, sem os quais essa jornada teria sido bem mais árida.

Aos demais professores, funcionários e alunos que de forma direta ou indireta contribuíram para minha formação.

Muito Obrigado

**Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ
como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro
Eletricista**

**ANÁLISE DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA DE ÍMÃ PERMANENTE COM
TENSÃO NÃO SENOIDAL**

Rafael de Carvalho Caetano

Dezembro 2013

O presente trabalho visa mostrar os fatores construtivos que influenciam na forma da tensão gerada bem como o ganho de potência obtido na utilização de máquinas com tensões não senoidais ao invés da geração senoidal padrão. Para isso, foram utilizados os softwares RMXprt, o Maxwell 2D e o Maxwell Circuit Editor.

Primeiramente é feito um breve resumo teórico sobre as máquinas síncronas, em especial aquela utilizada neste trabalho que é a máquina síncrona de ímã permanente (MSIP), para que se possa comparar as expectativas teóricas com os resultados obtidos.

Em seguida são modificadas algumas características de uma MSIP a fim de obter uma tensão gerada não senoidal. O modelo obtido nesta etapa é comparado com o modelo tradicional através da conexão dos mesmos a diferentes valores de carga.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer

**ANALYSIS OF A PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MACHINE WITH
NON SINUSOIDAL VOLTAGE**

Rafael de Carvalho Caetano

December 2013

The current study aims to show the constructive factors that have an effect on the generated voltage waveform as well as show the benefits regarding generated power when using non sinusoidal electrical machines over the traditional ones. In order to achieve this goal, three software's were used: RMXprt, o Maxwell 2D e o Maxwell Circuit Editor.

In the first part, a briefing theoretical resume is made about synchronous machine, giving particular attention to the machine used in this project, the permanent magnet synchronous machine (PMSM), which enables a comparison between the giving results and the theoretical expectation.

In a second part, some constructive features of the traditional MSIP are changed, attempting to produce a non sinusoidal voltage waveform. The model resulting from this step is compared to the traditional model through their connection to different load scenarios.

Sumário

Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tabelas.....	xi
1 Introdução	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Objetivo.....	2
2 Máquina Síncrona	3
2.1 Aspectos construtivos.....	3
2.2 Equações características e Circuito Equivalente	4
2.2.1 Máquina de pólos Lisos.....	4
2.2.2 Máquina Síncrona de Pólos Salientes (MSPS).....	6
2.3 Máquina síncrona de ímãs permanentes (MSIP).....	7
2.3.1 Aspectos Construtivos	7
2.3.2 Forma de Onda	8
2.3.3 Ímã Permanente.....	11
3 Softwares utilizados	14
3.1 RMXprt	14
3.1.1 Machine	15
3.1.2 Analysis	17
3.2 Maxwell 2D.....	17
3.2.1 Motion Setup	18
3.2.2 Excitations	19
3.2.3 Analysis	20
3.2.4 Results	22
3.3 Maxwell Circuit Editor	22
4 Modelagem do Gerador em estudo	23
4.1 Máquina Padrão	23
4.2 Número de pólos	26
4.3 Número de ranhuras	28
4.4 Dimensões das ranhuras	31
4.5 Dimensões dos ímãs	34
5 Comparação dos modelos	38

5.1	Ligação em delta	38
5.2	Ligação em estrela aterrado.....	46
5.3	Ligação em estrela não aterrado.....	53
5.4	Comparação entre as três formas de conexão	60
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	62
6.1	Considerações Finais.....	62
6.2	Trabalhos Futuros.....	63
7	Referências Bibliográficas	64

Lista de Figuras

Figura 1: Circuito Equivalente da Máquina Síncrona de pólos lisos	6
Figura 2: Rotores de máquinas síncronas com ímã permanente	8
Figura 3: Formas de onda do fluxo concatenado e da tensão induzida nas fases de uma máquina de onda quadrada	10
Figura 4: Curva BH típica.....	12
Figura 5: Principais Interfaces do RMXprt	14
Figura 6: Layout de máquina (estator + rotor) no programa RMXprt	15
Figura 7: Tipo de passo dos enrolamentos do estator no RMXprt.....	15
Figura 8: a-) Conexão das bobinas em passo pleno	16
Figura 9: Tipo de conexão dos enrolamentos do estator no RMXprt.....	16
Figura 10: Opções da aba “Analysis” no RMXprt.....	17
Figura 11: Principais interfaces presentes no programa Maxwell 2D	18
Figura 12: Opções da aba “Motion Setup” no Maxwell 2D	19
Figura 13: Disposição das fases nas ranhuras através da aba “Excitations” no Maxwell 2D	19
Figura 14: Opções de conexão dos enrolamentos no Maxwell 2D utilizadas no projeto: Corrente constante e circuito externo	20
Figura 15: Opções da aba “Analysis” no Maxwell 2D	21
Figura 16: Opções de análise no cálculo dos campos e fluxos no Maxwell 2D	21
Figura 17: Interface principal do Maxwell Circuit Editor.....	22
Figura 18: a-) Configuração do estator do GSIP padrão do RMXprt.....	24
Figura 19: a-) Configuração do rotor com ímã do GSIP padrão do RMXprt.	25
Figura 20: Modelo Maxwell do GSIP padrão do RMXprt	25
Figura 21: Tensões Induzidas no estator do GSIP padrão do RMXprt funcionando em circuito aberto.....	26
Figura 22: Modelo Maxwell do GSIP para a máquina de 2 pólos	27
Figura 23: Tensões Induzidas no estator do GSIP com 2 pólos funcionando em circuito aberto	27
Figura 24: a-) Configuração do estator do GSIP com 2 pólos e 12 ranhuras do RMXprt.....	28
Figura 25: Tensões Induzidas no estator do GSIP com 2 pólos e 12 ranhuras funcionando em circuito aberto.....	29
Figura 26: a-) Configuração do estator do GSIP com 2 pólos e 6 ranhuras do RMXprt.....	30
Figura 27: Tensões Induzidas no estator do GSIP com 2 pólos e 6 ranhuras funcionando em circuito aberto.....	30
Figura 28: Módulo das linhas de fluxo X distância no entreferro do GSIP com 2 pólos e 6 ranhuras funcionando em circuito aberto	31
Figura 29: Parâmetros da ranhura no modelo do GSIP Np RMXprt.....	32
Figura 30: Tensões Induzidas no estator do GSIP da configuração 1 funcionando em circuito aberto.....	33
Figura 31: Tensões Induzidas no estator do GSIP da configuração 2 funcionando em circuito aberto.....	33
Figura 32: Tensões Induzidas no estator do GSIP da configuração 3 funcionando em circuito aberto.....	33
Figura 33: Tensões Induzidas no estator do GSIP da configuração 3 e com espessura de 3,8mm funcionando em circuito aberto	34

Figura 34: Tensões Induzidas no estator do GSIP da configuração 3 e com comprimento de 80% funcionando em circuito aberto	35
Figura 35: a-) Modelo Maxwell do GSIP com 2 pólos, 6 ranhuras e ímã com comprimento de 70%.....	35
Figura 36: Tensões Induzidas no estator do GSIP da configuração 3 e com comprimento de 90% funcionando em circuito aberto	36
Figura 37: Tensões Induzidas no estator do GSIP do modelo padrão e do modelo modificado operando em circuito aberto	37
Figura 38: Circuito do GSIP conectado em delta	38
Figura 39: Tensão e corrente de linha para a máquina padrão conectada em delta com $R=100\ \Omega$	39
Figura 40: Tensão e corrente de linha para a máquina modificada conectada em delta com $R=100\Omega$	40
Figura 41: Módulo da densidade de fluxo magnético no entreferro para cargas de 1000Ω e 50Ω na conexão em delta.....	43
Figura 42: Formas de corrente da fase A para cargas Resistiva e RL de 100Ω na conexão em delta para a máquina modificada.....	45
Figura 43: Relação Potência x Carga para conexão em delta	45
Figura 44: Circuito do GSIP conectado em estrela aterrado	46
Figura 45: Tensão e corrente de linha para a máquina padrão conectada em estrela aterrado com $R=100\Omega$	47
Figura 46: Tensão e corrente de linha para a máquina modificada conectada em estrela aterrada com $R=100\ \Omega$	47
Figura 47: Harmônicos de 3ª ordem na corrente de neutro a máquina modificada conectada em estrela aterrada com $R=75\ \Omega$	48
Figura 48: Módulo da densidade de fluxo magnético no entreferro para cargas de 1000Ω e 30Ω na conexão em estrela aterrado	50
Figura 49: Formas de corrente das três fases para cargas Resistiva e RL de 100Ω na conexão estrela aterrado para a máquina modificada	52
Figura 50: Relação Potência x Carga para conexão em estrela	52
Figura 51: Circuito do GSIP conectado em estrela não aterrado	53
Figura 52: Tensão e corrente de linha para a máquina padrão conectada em estrela não aterrado com $R=100\ \Omega$	54
Figura 53: Tensão e corrente de linha para a máquina modificada conectada em estrela não aterrado com $R=100\ \Omega$	54
Figura 54: Tensão no enrolamento da fase A da máquina modificada conectada em estrela não aterrado para $R=100\ \Omega$	55
Figura 55: Módulo da densidade de fluxo no entreferro para cargas de 10Ω e 1000Ω na conexão em estrela não aterrado.....	57
Figura 56: Formas de corrente da fase A para cargas Resistiva e RL de 100Ω na conexão estrela não aterrado para máquina modificada.....	59
Figura 57: Relação Potência x Carga para conexão em estrela não aterrado	60
Figura 58: Relação Potência x Carga da ligação delta, estrela e estrela não aterrado	61

Lista de Tabelas

Tabela 1: Parâmetros da ranhura no modelo do GSIP em diferentes configurações	32
Tabela 2: Principais parâmetros dos modelos do GSIP : Máquina de onda senoidal e Máquina de onda trapezoidal.....	36
Tabela 3: Valores de tensão, corrente e potência na conexão em delta	41
Tabela 4: Potência no eixo das máquinas e rendimento na conexão em delta	44
Tabela 5: Valores de tensão, corrente e potência na conexão em estrela aterrado .	49
Tabela 6: Potência no eixo das máquinas e rendimento na conexão em estrela aterrado.....	51
Tabela 7: Valores de tensão, corrente e potência na conexão em estrela não aterrado	56
Tabela 8: Potência no eixo das máquinas e rendimento na conexão em estrela não aterrado.....	59

1 Introdução

1.1 Motivação

Não é difícil perceber a importância da energia elétrica para a sociedade atual. Desde os aparelhos utilizados nas residências até as complexas plantas industriais de grandes empresas, todos necessitam de energia barata e em quantidade. O crescimento acentuado da população e as metas de desenvolvimento econômico dos países exigem um aumento crescente da oferta de energia elétrica. Além disso, o aumento da preocupação com o meio ambiente tem disseminado a consciência da busca por um melhor aproveitamento dos recursos naturais, impulsionando a procura por fontes de energia que causem menor impacto à natureza a longo e médio prazo. Essas fontes, chamadas de fontes alternativas e renováveis de energia, têm sido objeto de uma série de estudos visando o seu desenvolvimento e aperfeiçoamento.

Neste cenário, um grande destaque tem sido dado à energia eólica. Sobretudo no Brasil, que ainda possui uma matriz energética extremamente dependente de apenas um tipo de energia (energia hidráulica) e que apresenta, em parte do seu território, um regime de ventos que viabiliza uma maior utilização da energia eólica. Por isso, a última edição do PDE (Plano Decenal de Expansão de Energia) [1] aponta para um crescente investimento na utilização de fontes alternativas de energia na composição da matriz energética brasileira. Por este motivo, o estudo e a pesquisa em torno dos equipamentos envolvidos no processo de geração desta energia são importantes e cada vez mais necessários.

Dentre os diversos tipos de geradores existentes, a máquina síncrona de ímã permanente (MSIP), além de despertar grande interesse acadêmico, tem sido utilizada nas fazendas eólicas para potências da ordem de até 5MW [2]. Ela possui um menor peso por kW gerado quando comparada às demais máquinas, além de apresentar menos perdas devido à ausência dos enrolamentos de campo. Comumente, essas máquinas são fabricadas de tal forma a gerarem uma tensão com forma de onda senoidal. Porém, nas aplicações de energia eólica, a tensão gerada deve invariavelmente passar por um retificador para ser adequada às

exigências da rede. Por esta razão, pode-se conceber uma MSIP que gere uma tensão trapezoidal e que com isso, possua vantagens quando comparada à geração tradicional.

1.2 Objetivo

Este trabalho tem por objetivo analisar os fatores que influenciam na forma de onda da tensão gerada e mostrar o ganho de potência obtido na utilização de máquinas com tensões não senoidais ao invés da geração senoidal padrão.

No capítulo 2 é feita uma revisão dos conceitos teóricos necessários para a análise das máquinas síncronas em regime permanente, bem como os aspectos construtivos mais relevantes.

No capítulo 3 serão mostradas algumas características e o funcionamento dos dois principais softwares utilizados nas simulações deste trabalho.

Em seguida, serão mostradas no capítulo 4 as modificações feitas em uma MSIP visando obter uma forma de tensão mais próxima da trapezoidal.

No capítulo 5 será feita uma comparação do desempenho dos dois tipos de máquina modeladas (senoidal e trapezoidal) em termos de potência gerada e também uma análise de como a forma com que os enrolamentos são conectados pode afetar esse resultado.

No capítulo 6 serão apresentadas as devidas conclusões bem como as perspectivas para futuros trabalhos.

2 Máquina Síncrona

A máquina síncrona é um conversor eletromecânico rotativo, que tem seu funcionamento baseado na produção de campos girantes no entreferro. Os enrolamentos do estator são alimentados com corrente alternada, enquanto o rotor é excitado com corrente contínua por meio de escovas e anéis coletores. Sua principal característica é que, em regime permanente, a frequência elétrica é diretamente proporcional à velocidade do rotor e ao número de pólos. Possui também uma vantagem quando comparada com as demais máquinas elétricas, que é o fato de poder funcionar com fator de potência indutivo ou capacitivo, através do ajuste de sua corrente de campo. Elas podem, portanto, operar como gerador, como motor ou como compensador.

2.1 Aspectos construtivos

Na sua grande maioria, as máquinas síncronas são trifásicas, ou seja, possuem três enrolamentos equilibrados e distribuídos simetricamente. Esses enrolamentos, denominados enrolamentos de armadura, geralmente localizam-se no estator, enquanto o enrolamento de campo está no rotor.

O rotor é constituído de aço. Sua distribuição de fluxo é estabelecida por corrente contínua ou ainda por ímãs permanentes, e é estacionária em relação ao rotor. Seus pólos podem ser:

- Lisos : enrolamentos distribuídos simetricamente em ranhuras, assim como no estator, de forma que se pode considerar o entreferro constante. Trabalham tipicamente em velocidades de 1200 a 3600 rpm e possuem uma geometria tal que o seu diâmetro interno é bem menor que seu comprimento axial. São utilizados em aplicações com maior velocidade, como é o caso das turbinas a gás ou a vapor, nestes casos recebendo o nome de turbogeradores.
- Salientes: enrolamentos concentrados que, para acomodar as diversas peças polares, necessitam de rotores com grandes diâmetros em relação ao

seu comprimento axial. Por esta razão, são mais utilizados em aplicações que trabalhem em baixa velocidade, como é o caso dos hidrogeradores.

O estator constitui a parte fixa da máquina. É tipicamente constituído de aço laminado de forma a reduzir as perdas por histerese e corrente de Foucault, e possui diversas ranhuras onde são colocados os enrolamentos de armadura. O projeto do estator visa a produção de um fluxo magnético com distribuição espacial o mais próximo possível da senoidal, de forma a obter tensões praticamente senoidais no tempo.

2.2 Equações características e Circuito Equivalente

Na busca de um modelo satisfatório para representar eletricamente os fenômenos eletromecânicos envolvidos no funcionamento da máquina síncrona, é necessário analisar a origem das diversas indutâncias presentes. Esta análise será feita para a máquina de pólos lisos e, em seguida, para máquina de pólos salientes.

2.2.1 Máquina de pólos Lisos

Supondo uma máquina trifásica e aplicando-se a lei de Faraday, podemos escrever a equação do fluxo concatenado por cada uma dessas fases:

$$\begin{aligned}\lambda_a &= L_{aa}i_a + L_{ab}i_b + L_{ac}i_c + L_{af}i_f \\ \lambda_b &= L_{ba}i_a + L_{bb}i_b + L_{bc}i_c + L_{bf}i_f \\ \lambda_c &= L_{ca}i_a + L_{cb}i_b + L_{cc}i_c + L_{cf}i_f \\ \lambda_f &= L_{fa}i_a + L_{fb}i_b + L_{fc}i_c + L_{ff}i_f\end{aligned}\tag{15}$$

Onde, L_{aa}, L_{bb}, L_{cc} são as indutâncias próprias de cada fase e, $L_{ab}, L_{ba}, L_{ac}, L_{ca}, L_{bc}, L_{cb}$ são as indutâncias mútuas entre as fases.

As indutância próprias do enrolamento de campo não variam com a posição do rotor, logo elas podem ser escritas como uma parcela devida à componente fundamental e outra devida à dispersão:

$$L_{ff} = L_{ff0} + L_{f1}\tag{16}$$

As indutâncias mútuas entre estator e rotor variam periodicamente com a posição relativa entre o eixo magnético do enrolamento de campo e o enrolamento de fase [3]. Sabendo que o motor gira com velocidade síncrona e supondo que a

distribuição de fluxo no entreferro seja aproximadamente senoidal, podemos escrever a indutância mútua:

$$L_{af} = L_{afMax} \cos(w_e t + \delta_e) \quad (17)$$

Onde, δ_e é o ângulo elétrico do rotor no tempo $t=0$.

Semelhantemente ao rotor, as indutâncias próprias do estator também não dependem da posição do rotor. Portanto, são consideradas como a soma de uma componente fundamental e outra de fluxo de dispersão da armadura:

$$L_{aa} = L_{aa0} + L_{al} \quad (18)$$

Como as fases na armadura estão espaçadas de 120° elétricos e como $\cos(120^\circ) = -\frac{1}{2}$:

$$L_{ab} = L_{ba} = L_{ac} = L_{ca} = L_{bc} = L_{cb} = -\frac{1}{2} L_{aa0} \quad (19)$$

Utilizando-se os resultados obtidos, o fluxo concatenado pela fase a pode ser escrito como:

$$\lambda_a = (L_{aa0} + L_{al}) i_a - \frac{1}{2} L_{aa0} (i_b + i_c) + L_{af} i_f \quad (20)$$

Como as correntes na armadura são equilibradas, sua soma é igual a 0. Logo:

$$\lambda_a = \left(\frac{3}{2} L_{aa0} + L_{al} \right) i_a + L_{af} i_f \quad (21)$$

Onde $L_s = \frac{3}{2} L_{aa0} + L_{al}$

O mesmo raciocínio pode ser aplicado às demais fases:

$$\lambda_b = \left(\frac{3}{2} L_{bb0} + L_{bl} \right) i_b + L_{bf} i_f \quad (22)$$

$$\lambda_c = \left(\frac{3}{2} L_{cc0} + L_{cl} \right) i_c + L_{cf} i_f \quad (23)$$

A tensão induzida pelo fluxo de enrolamento de campo é dada pela derivada do fluxo total concatenado por cada fase:

$$e_{af} = \frac{d}{dt} (L_{af} i_f) = -w_e L_{af} i_f \sin(w_e t + \delta_{eo}) , \quad (24)$$

onde i_f é a corrente CC da excitação de campo.

A tensão e_{af} também é chamada de tensão interna ou tensão gerada.

A tensão nos terminais de cada fase é dada pela soma da queda de tensão na resistência de armadura e da tensão induzida:

$$v_a = R_a i_a + \frac{d}{dt} \lambda_a \quad (25)$$

Escrevendo-se esta equação utilizando fasores, temos:

$$E_{af} = R_a \dot{I}_a + jX_s \dot{I}_a + \dot{V}_a \quad (26)$$

Este resultado nos permite representar a máquina por um circuito equivalente, conforme mostrado na figura 1:

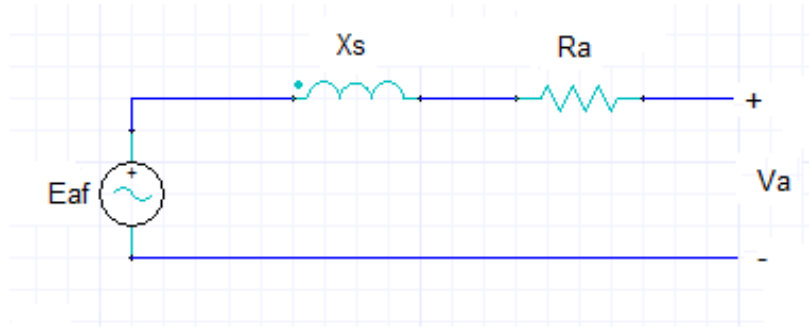


Figura 1: Circuito Equivalente da Máquina Síncrona de pólos lisos

2.2.2 Máquina Síncrona de Pólos Salientes (MSPS)

O mesmo raciocínio utilizado anteriormente aplica-se aqui com a diferença que, ao contrário da máquina de pólos lisos, na MSPS a posição dos pólos do campo determinam um caminho preferencial de magnetização.

De acordo com a permeância encontrada definem-se 2 eixos na máquina: eixo polar (eixo direto do rotor) e eixo interpolar (eixo de quadratura). Eles estão defasados de 90° entre si e a permeância ao longo deste último é consideravelmente menor do que a permeância ao longo do primeiro.

O enrolamento de campo produz fluxo orientado segundo o eixo direto do rotor. A tensão interna está adiantada 90° em relação à este fluxo e portanto, encontra-se localizada sobre o eixo em quadratura [3].

Com relação às componentes espaciais da FMM e do fluxo de entreferro, a análise dos efeitos oriundos da saliência dos pólos pode ser feita decompondo-se a corrente de armadura em duas componentes \dot{I}_d e \dot{I}_q , uma ao longo do eixo direto e outra ao longo do eixo em quadratura, respectivamente.

Por sua vez, cada uma dessas componentes terá uma queda de tensão associada às reatâncias síncronas, $j\dot{I}_d X_d$ e $j\dot{I}_q X_q$. As reatâncias X_d e X_q são respectivamente, as reatâncias síncronas de eixo direto e de armadura. Elas

representam os efeitos indutivos das componentes espaciais fundamentais dos fluxos criados pela corrente de armadura, incluindo os fluxos de dispersão e de reação de armadura. Numericamente, a reatância do eixo direto X_d é maior do que a reatância do eixo em quadratura X_q , o que se deve ao fato da relutância do entreferro ser mais elevada no eixo em quadratura.

Portanto, assim como na análise feita para uma máquina de pólos lisos, a tensão interna gerada será igual a tensão no terminal da máquina mais a queda na resistência de armadura mais a queda em cada componente de reatância síncrona.

$$E_{af} = \dot{V}_a + R_a \dot{I}_a + jX_d \dot{I}_d + jX_q \dot{I}_q \quad (27)$$

2.3 Máquina síncrona de ímãs permanentes (MSIP)

Neste tipo de máquina o enrolamento de armadura é polifásico e colocado nas ranhuras do estator, enquanto os ímãs são colocados no rotor e portanto, giram juntamente com ele. Assim, as MSIP são semelhantes às máquinas síncronas tradicionais, exceto pelos enrolamentos de campo, que são substituídos por ímãs permanentes.

2.3.1 Aspectos Construtivos

Nas aplicações de maior potência, o enrolamento do estator e o formato das lâminas utilizadas no núcleo são semelhantes àqueles usados nas demais máquinas de corrente alternada. Para níveis de potência mais baixo, o enrolamento pode ser concentrado ao invés de distribuído. Porém, a maior diferença entre essas máquinas se dá na geometria do rotor e na posição de fixação dos ímãs, que pode ser classificada da seguinte maneira:

- Ímãs fixados sobre a superfície do rotor:

Este tipo de máquina pode ser de rotor sólido ou laminado. Como a espessura desses ímãs é considerável, eles exigem entreferros grandes e, como eles possuem permeabilidade magnética próxima à do entreferro, a relutância ao longo do entreferro é praticamente constante, fazendo com que as indutâncias de magnetização tenham valores baixos e praticamente iguais. Portanto, essas

máquinas são analisadas como se fossem máquinas de pólos lisos, ou seja, $X_d = X_q$, conforme é exemplificado na Figura 2a

- Ímãs fixados na parte interna do rotor:

Nessa categoria, diferenciam-se as máquinas que possuem ímãs parcialmente fixados na parte interna do rotor daquelas cujos ímãs estão totalmente embutidos no rotor. Porém, ambos os casos são mais robustos do que aquele em que os ímãs são colocados sobre a superfície, fazendo com que possam operar em aplicações que exigem velocidades maiores [4].

Para os ímãs parcialmente fixados (Figura 2b), o entreferro na linha do ímã, que está localizado sobre o eixo direto, é maior do que aquele da região interpolar, localizado sobre o eixo de quadratura. Portanto, temos que $X_d < X_q$.

Os ímãs embutidos no rotor possuem 2 tipos de magnetização: radial ou aquela em que a direção de magnetização é a mesma da circunferência, conforme mostrado na Figura 2c e Figura 2d. No primeiro caso, a relutância de eixo direto é maior do que a do eixo em quadratura visto que os ímãs tem permeabilidade magnética menor que a do ferro, o que implica em $X_d < X_q$. No segundo caso, o eixo direto possui relutância menor, fazendo com que $X_d > X_q$.

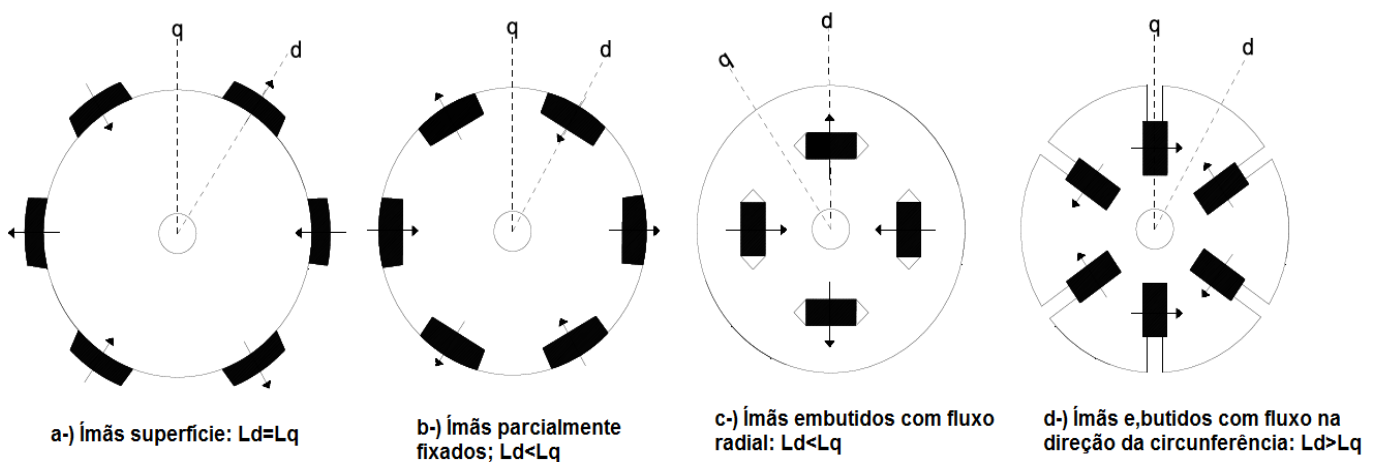


Figura 2: Rotores de máquinas síncronas com ímã permanente

2.3.2 Forma de Onda

Quanto à forma de onda gerada, as MSIP são classificadas em máquinas de onda senoidal e máquinas de onda quadrada.

- Máquina de Onda Senoidal

Essas máquinas são caracterizadas por possuírem enrolamentos do estator distribuídos. A configuração do rotor é projetada de tal maneira que o fluxo dos ímãs estabeleça uma densidade de fluxo aproximadamente senoidal. Por isso, diferentemente dos motores de onda quadrada, a tensão induzida em cada fase varia senoidalmente com a posição do rotor. Os modelos mais utilizados são do tipo ímã sobre a superfície ou ímã totalmente embutido no rotor.

Seu princípio de funcionamento é baseado na excitação simultânea das fases para a obtenção do campo girante, o que faz com que esse tipo de máquina possa ser analisado como sendo uma máquina síncrona de campo girante convencional.

- Máquina de Onda Quadrada

Neste tipo de máquina, os ímãs são na forma de arco e cobrem 180° ou 120° elétricos do entreferro, sendo fixados sobre a superfície do rotor. O enrolamento do estator pode ser do tipo distribuído ou concentrado.

Idealmente, a distribuição da densidade de fluxo imposta pelos ímãs é retangular. Na prática porém, essa distribuição tende a ser aproximadamente trapezoidal devido ao efeito de espraçamento do fluxo que ocorre nas extremidades dos ímãs. Na análise que se segue, será utilizada uma máquina de 2 pólos ligada em delta, com enrolamento de armadura trifásico e distribuído e com um ímã cobrindo 120° do entreferro.

Com a rotação do rotor, a forma de onda do fluxo concatenado com o enrolamento concentrado de qualquer uma das fases pode ser considerado uma onda trapezoidal, conforme mostrado na figura 3. Como a densidade de fluxo estabelecida no entreferro pelos ímãs depende da posição do rotor que por sua vez varia no tempo, ao aplicar a lei de Faraday para a fase a , temos:

$$e_a(\theta_r) = \frac{d\theta_r}{dt} \frac{d\varphi_a}{d\theta_r} = \frac{p}{2} w_m \frac{d\lambda_a}{d\theta_r} \quad (28)$$

Onde θ_r é a posição do rotor

φ_a é a densidade de fluxo concatenado pela fase a

p é o número de pólos da máquina

w_m é a velocidade de rotação

O mesmo se aplica às demais fases:

$$e_b(\theta_r) = \frac{p}{2} w_m \frac{d\varphi_b}{d\theta_r} \quad (29)$$

$$e_c(\theta_r) = \frac{p}{2} w_m \frac{d\varphi_c}{d\theta_r} \quad (30)$$

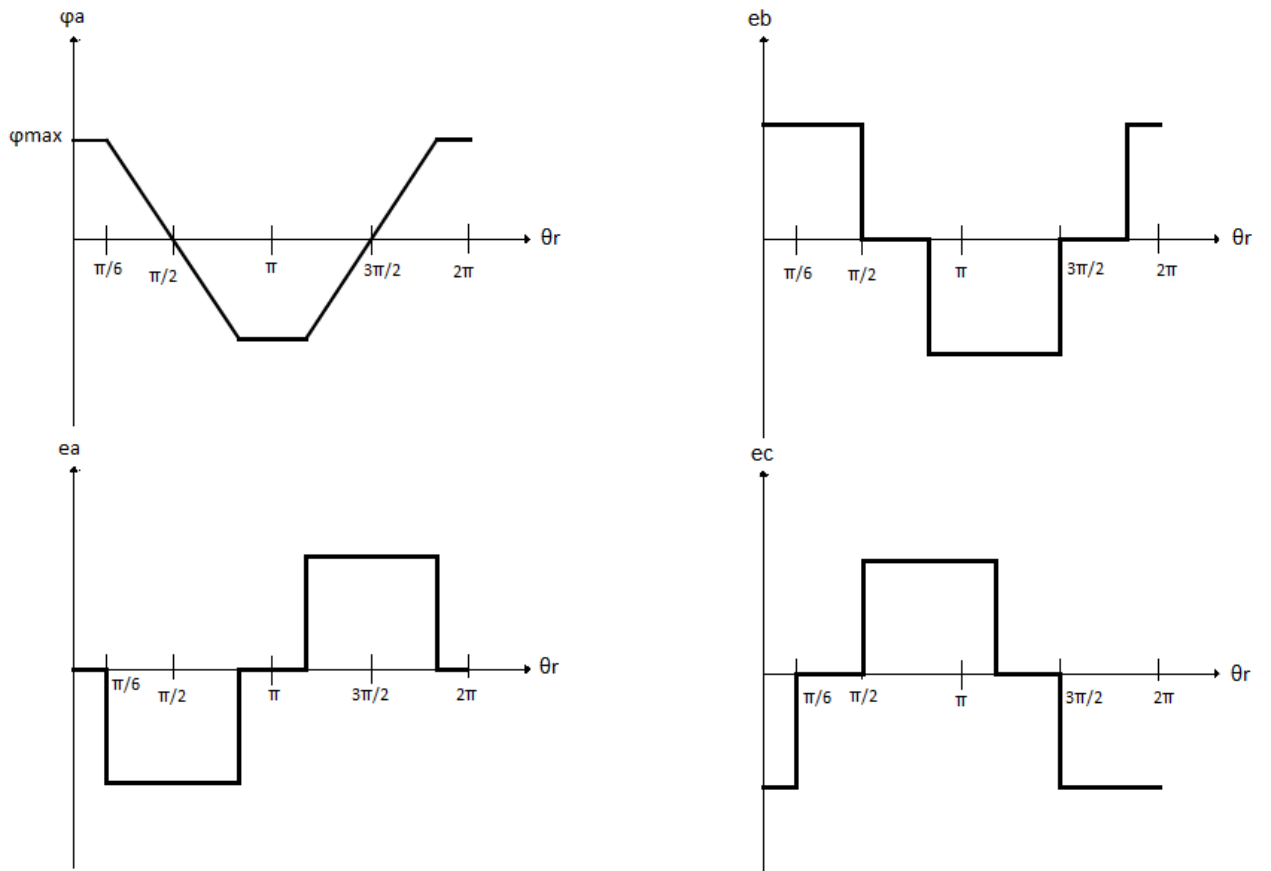


Figura 3: Formas de onda do fluxo concatenado e da tensão induzida nas fases de uma máquina de onda quadrada

Considerando-se a velocidade do rotor constante, as formas de onda das tensões induzidas em cada bobina terão a forma retangular e, como o estator é trifásico, essas tensões estarão defasadas entre si de 120° elétricos.

A amplitude das tensões induzidas é calculada de acordo com a variação do fluxo concatenado. Portanto, ao analisarmos a figura 3, temos que o valor máximo da tensão induzida na fase a é:

$$V_a(\theta_r) = \frac{p}{2} w_m \frac{\Delta\lambda_{max}}{\Delta\theta_r} = \frac{p}{2} w_m \frac{2\lambda_{max}}{2\pi/3} = \frac{3p}{\pi} w_m \lambda_{max} \quad (31)$$

O ponto de máximo torque ocorre quando o ângulo espacial entre o fluxo do rotor e o fluxo do estator é de 90° elétricos. Sabendo-se que as tensões induzidas são iguais a zero quando o fluxo concatenado é máximo, deve-se garantir que a corrente e a fem estejam em fase. Isto é possível através do chaveamento da alimentação, com as corrente sendo chaveadas em intervalos de 60° elétricos [4].

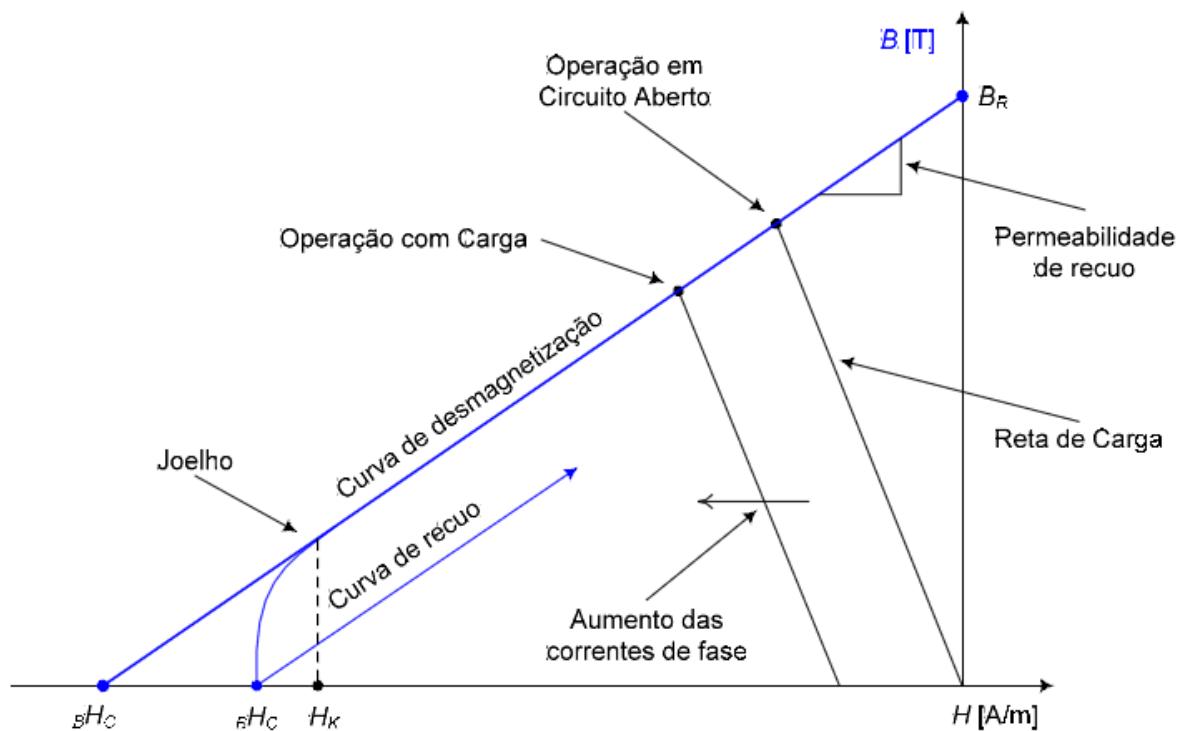
Para uma máquina conectada em estrela, somente duas fases são alimentadas simultaneamente e, como a fmm gerada por essas duas fases é constante, deve haver uma alternância das fases alimentadas de forma a se obter o deslocamento da fmm a cada deslocamento de 60° elétricos do rotor.

Portanto, ao contrário das máquinas tradicionais onde a fmm se desloca de forma contínua, nas máquinas trapezoidais o deslocamento ocorre em intervalos, a cada 60° graus elétricos do rotor.

2.3.3 Ímã Permanente

Também conhecidos como materiais magnéticos duros, são caracterizados por uma alta indução residual e, conseqüentemente, por valores altos de campo coercitivo intrínseco. Os ímãs mais utilizados na fabricação das MSIP são os de Ferrite e, mais recentemente os ímãs de alta energia, também conhecidos ímãs de terras raras, tais como os de Samário-Cobalto (SmCo) e de Neodímio-Ferro-Boro (NdFeB) [5].

Para a análise das propriedades magnéticas do ímã são utilizados diversos parâmetros, que são mais facilmente visualizados e compreendidos através da curva BH, mostrada na figura 4.



O parâmetro B_r , chamado de indução residual, é o valor de indução resultante quando o campo magnético aplicado H é igual a zero. Em outras palavras, é a quantidade de indução que um ímã é capaz de fornecer mesmo quando envolto por um material de permeabilidade infinita. Porém, deve-se ressaltar que nas aplicações em máquinas elétricas os ímãs trabalham abaixo disso, com valores entre 70% e 95% de B_r . Isto se dá pela queda de força magnetomotriz no entreferro, que atua como um campo desmagnetizante sobre o ímã. Além disso, existe a ação do campo desmagnetizante gerado pelas correntes de fase, fazendo com que o ponto de operação do ímã caminhe sobre a curva BH conforme a carga do motor.

A forma da curva de magnetização varia com o tipo de ímã. Para alguns deles ela permanece sempre reta, de forma a sempre retornar ao ponto de operação em circuito aberto quando o campo imposto pelas correntes de fase é retirado. Em outros casos porém, a curva de desmagnetização possui uma ligeira variação em forma de joelho com um valor de campo H_k . Se este valor limite for ultrapassado haverá perda de magnetismo no material, fazendo com que a curva de desmagnetização do material reduza de tamanho. A inclinação dessa curva é chamada de permeabilidade de recuo μ_{rec} .

Na maioria dos casos, a curva de magnetização dos ímãs varia com a temperatura. Nos ímãs de terras raras por exemplo, ela é reta em temperatura ambiente e apresenta pequenos joelhos sob a ação de alta temperatura. Essa máxima temperatura de serviço deve ser respeitada, sob pena de causar deformações no material e deteriorar suas propriedades magnéticas. Já no caso dos ímãs de Ferrite ocorre o inverso, eles apresentam joelhos quando são submetidos à temperatura baixa.

De forma geral, os parâmetros mais importantes para se caracterizar o ímã permanente além da indução residual, são:

- Campo coercitivo intrínseco: mede a intensidade do campo que deve ser aplicado ao material para que a polarização intrínseca seja zero.
- Máximo produto de energia BH: é a máxima quantidade de energia que pode ser obtida de um ímã para a realização de trabalho.

Esses parâmetros, juntamente com o desejável comportamento linear da curva de magnetização, são ponto de extrema importância no projeto das MSIP, uma vez que materiais com características diferentes levam a diferentes configurações de máquinas.

Dentre os materiais mais utilizados em aplicações de alto desempenho, estão as ligas de Samário-Cobalto (SmCo), pois apresentam valores de indução residual elevados e também comportamento linear para a curva de magnetização. Além disso, a baixa influência da temperatura sobre suas propriedades magnéticas possibilita sua operação em uma grande gama de aplicações. Porém, seu custo elevado tem sido o maior obstáculo à sua utilização em larga escala.

Como alternativa aos ímãs de SmCo, os ímãs de NdFeB tem sido usados nas MSIP, nos motores de passo e nas máquinas de corrente contínua sem escovas. Isto acontece pois além de serem mais baratos que os ímãs de SmCo, possuem maior oferta em escala industrial. Como aspecto negativo temos que esses ímãs têm seu desempenho fortemente prejudicado pela temperatura, possuindo uma baixa temperatura de serviço, em torno de 80°C a 200°C.

3 Softwares utilizados

Este capítulo tem por objetivo descrever de forma sucinta o funcionamento e as principais características dos programas utilizados neste trabalho, que são o RMXprt, o Maxwell 2D e o Maxwell Circuit Editor, todos do pacote Maxwell 14.0 da Ansoft. Os detalhes da configuração adotada para a máquina utilizada neste trabalho serão tratados no capítulo “Modelagem do Gerador em estudo”.

3.1 RMXprt

O RMXprt é um programa do pacote Maxwell que tem por finalidade criar modelos de dispositivos eletromagnéticos, em especial as máquinas elétricas rotativas. Ele permite que sejam definidos diversos parâmetros da máquina, tanto os construtivos (dimensões do rotor, estator e das ranhuras, número de pólos, número de ranhuras, tipo de enrolamentos, dentre outros), quanto os elétricos (tensão nominal, potência nominal, frequência nominal, torque nominal, dentre outros). Além disso, ele possui uma biblioteca com vários modelos de máquinas como exemplo, dentre eles o PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generator), que será a máquina estudada neste trabalho.

As principais interfaces presentes no RMXprt estão mostradas abaixo:

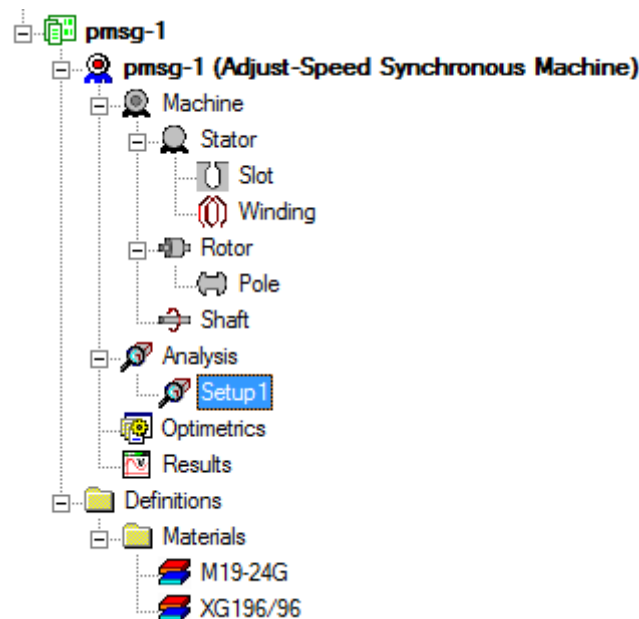


Figura 5: Principais Interfaces do RMXprt

3.1.1 Machine

Nesta aba, pode-se alterar os parâmetros elétricos da máquina que permitem um alto nível de detalhamento, como a escolha do valor das perdas por atrito, tipo de controle que será utilizado na máquina, tipo de conexão, dentre outros. Um exemplo de layout de máquina do RMXprt exibida nesta aba é mostrado na figura 6.

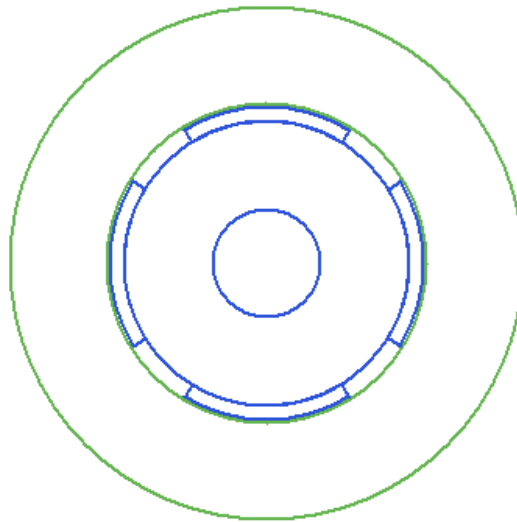


Figura 6: Layout de máquina (estator + rotor) no programa RMXprt

Ela possui também outros dois sub itens de extrema importância, que são as abas “Stator” e “Rotor”. A primeira permite a modelagem de todas as dimensões físicas do estator, bem como o tipo de passo adotado nos enrolamentos e como estes serão conectados no estator, conforme mostram as figuras 7 e 8. Neste projeto serão adotados os enrolamentos com passo pleno.

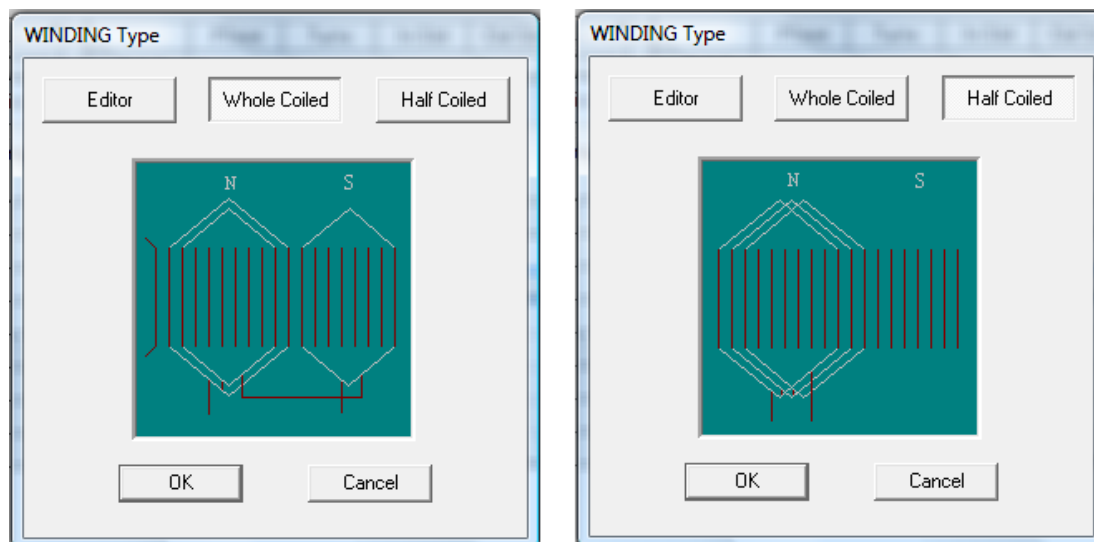


Figura 7: Tipo de passo dos enrolamentos do estator no RMXprt

3.1.2 Analysis

Após definidos os principais parâmetros construtivos da máquina, é necessário definir a sua forma de operação. Isto é feito através da aba analysis. Através dela, podemos escolher o tipo de operação da máquina, que neste trabalho funcionará como gerador, a rede na qual ela estará conectada e suas características nominais. A frequência nominal adotada é de 60Hz, fazendo com que inicialmente, a velocidade de rotação seja de 1800rpm. A figura 10 ilustra as opções encontradas neste item.

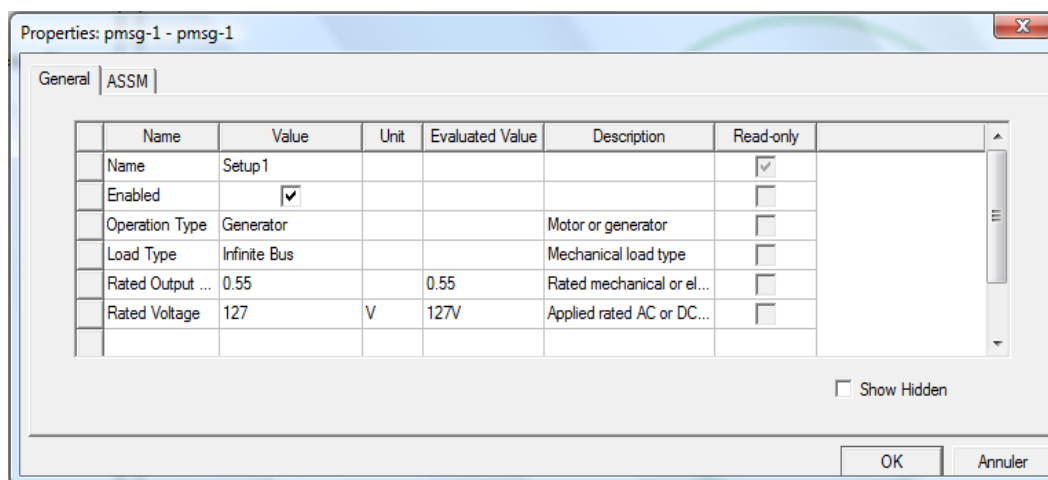


Figura 10: Opções da aba “Analysis” no RMXprt

Quando os parâmetros construtivos e operativos forem definidos, o RMXprt possui uma ferramenta capaz de buscar algum possível erro na modelagem e, caso não haja nenhum, criar um modelo Maxwell 2D.

3.2 Maxwell 2D

O Maxwell 2D é o programa que, a partir do modelo criado no RMXprt, realiza simulações de funcionamento dos dispositivos em diversas situações e aplicações. Ele utiliza o método dos elementos finitos e é capaz de calcular as principais grandezas envolvidas na simulação, tais como tensão, corrente, campos elétricos e magnéticos, densidade de fluxo, e permite a exibição dos resultados através de diversos tipos de gráficos.

As principais interfaces presentes no Maxwell 2D estão mostradas na figura 11.

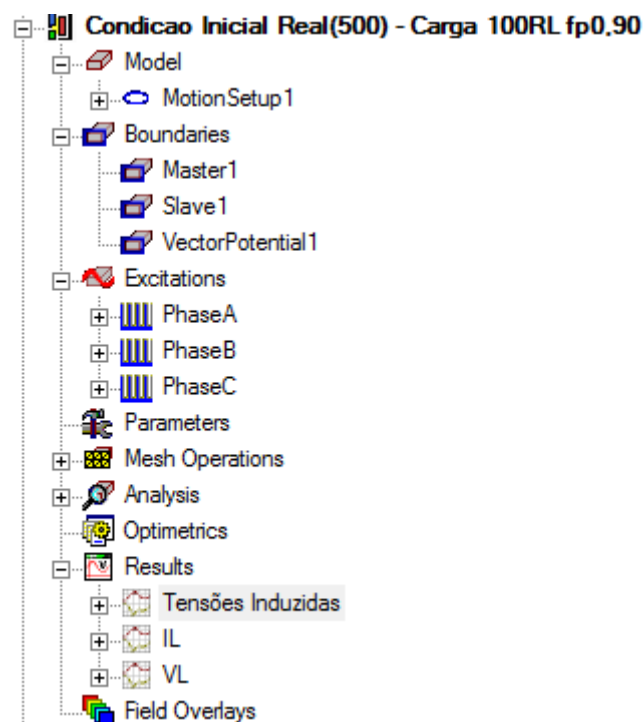


Figura 11: Principais interfaces presentes no programa Maxwell 2D

As funções do Maxwell 2D mais importantes no desenvolvimento deste trabalho serão mostradas a seguir.

3.2.1 Motion Setup

Esta aba trata de algumas configurações mecânicas da máquina: eixo de rotação, velocidade de rotação, ângulo inicial de funcionamento, momento de inércia. Existe também a opção de se desprezar os transitórios mecânicos, o que equivale a colocar a máquina para girar em uma velocidade definida. Esta opção foi utilizada neste trabalho, uma vez que o seu cerne trata da forma de onda e da potência obtidas em regime permanente. A figura 12 ilustra as opções encontradas neste item.

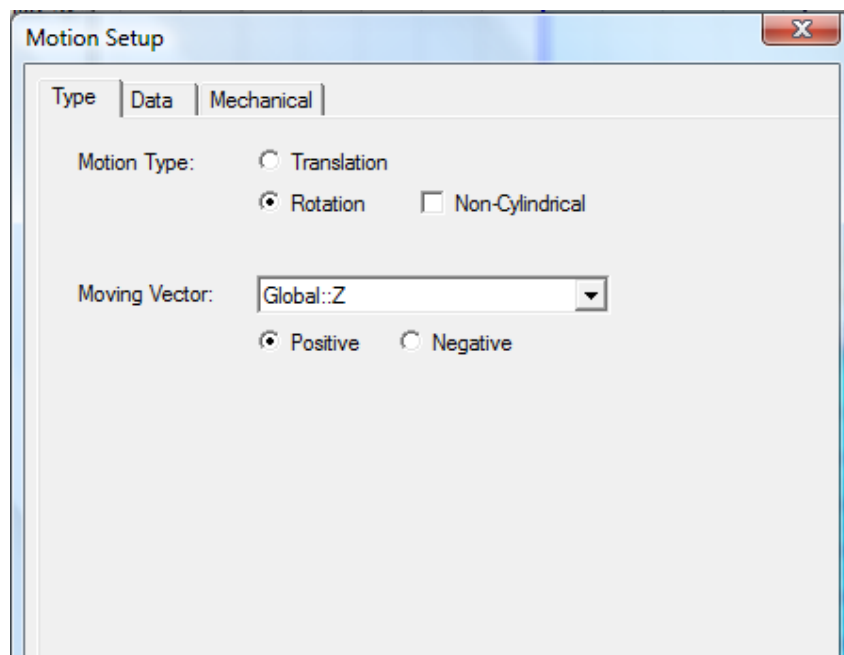


Figura 12: Opções da aba “Motion Setup” no Maxwell 2D

3.2.2 Excitations

Nesta aba, pode-se definir as características dos enrolamento da máquina, tais como quantidade de condutores por ranhura, dimensão dos condutores e polaridade. É possível também, ver a disposição das fases através das ranhuras, conforme mostrado na figura 13.

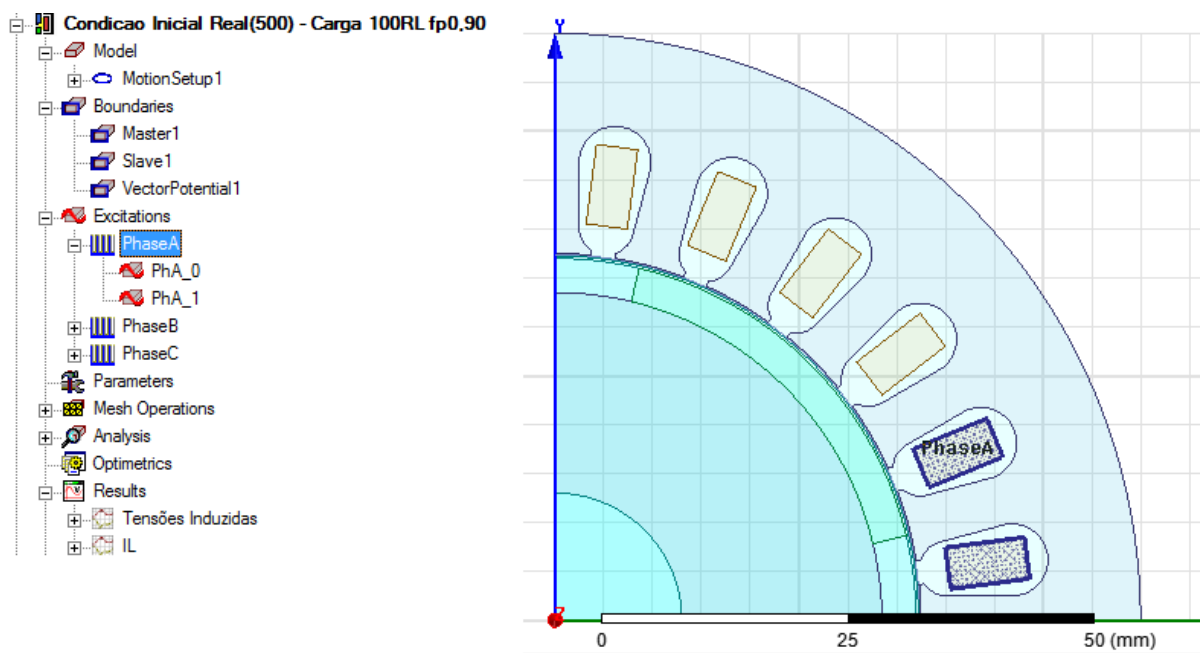


Figura 13: Disposição das fases nas ranhuras através da aba “Excitations” no Maxwell 2D

Outra função presente nesta aba trata da alimentação dos enrolamentos. Inicialmente, optou-se por utilizar uma conexão com corrente constante e igual a zero, ou seja, com a máquina em vazio. Posteriormente, foi preciso conectar a máquina a um circuito e para isso utilizou-se a opção “external”, conforme mostrado na figura 14. Esta opção permite a comunicação do Modelo Maxwell com o programa de edição de circuitos, o que será detalhadamente no item 3.3.

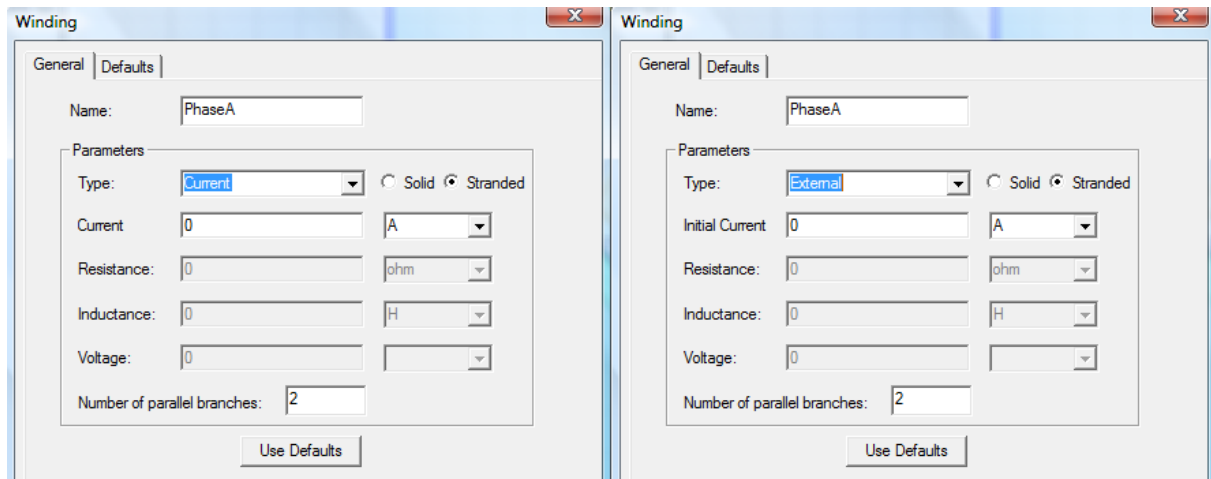


Figura 14: Opções de conexão dos enrolamentos no Maxwell 2D utilizadas no projeto: Corrente constante e circuito externo

3.2.3 Analysis

Nesta aba são escolhidos os principais parâmetros referentes à análise do modelo simulado. Através dela são definidos o tempo de simulação e o passo de tempo utilizado nos cálculos. Esse ponto é de extrema importância, uma vez que uma das principais desvantagens do Maxwell 2D é exatamente o tempo gasto em cada simulação. Por isso, foram feitas diversas tentativas de achar a melhor relação entre o passo de tempo e a precisão dos resultados. Nas aplicações feitas neste trabalho, bons resultados foram obtidos para passo de tempo igual a 0,2 ms e este valor foi adotado em todas as simulações aqui apresentadas. A figura 15 ilustra as opções encontradas neste campo.

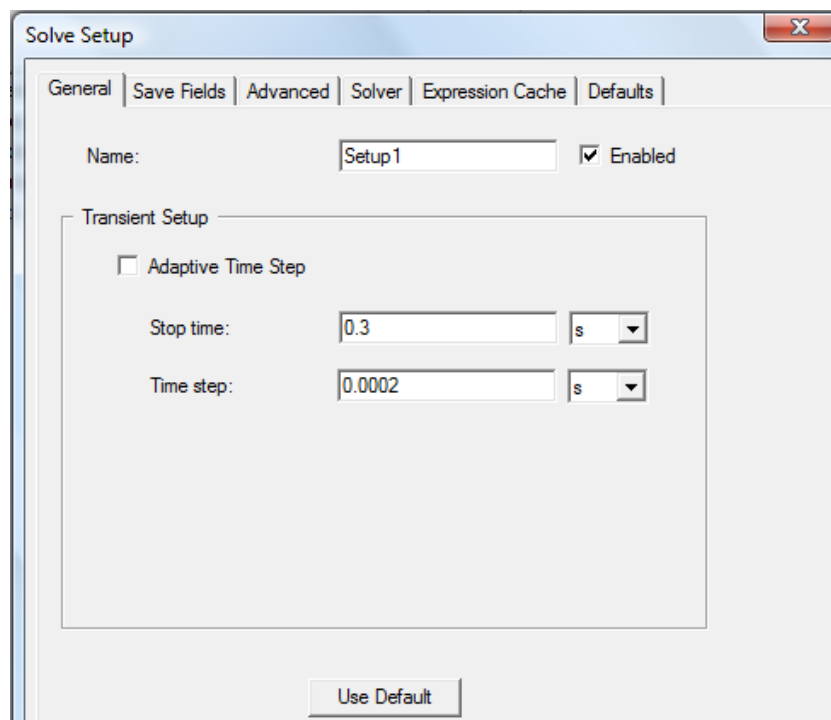


Figura 15: Opções da aba “Analysis” no Maxwell 2D

Além disso, pode-se também escolher o tempo de análise e o passo de tempo referente aos resultados obtidos nos cálculos dos campos e linhas de fluxo. Neste trabalho, foi adotado um passo de tempo igual a 0,5 ms para estes cálculos, conforme mostrado na figura 16:

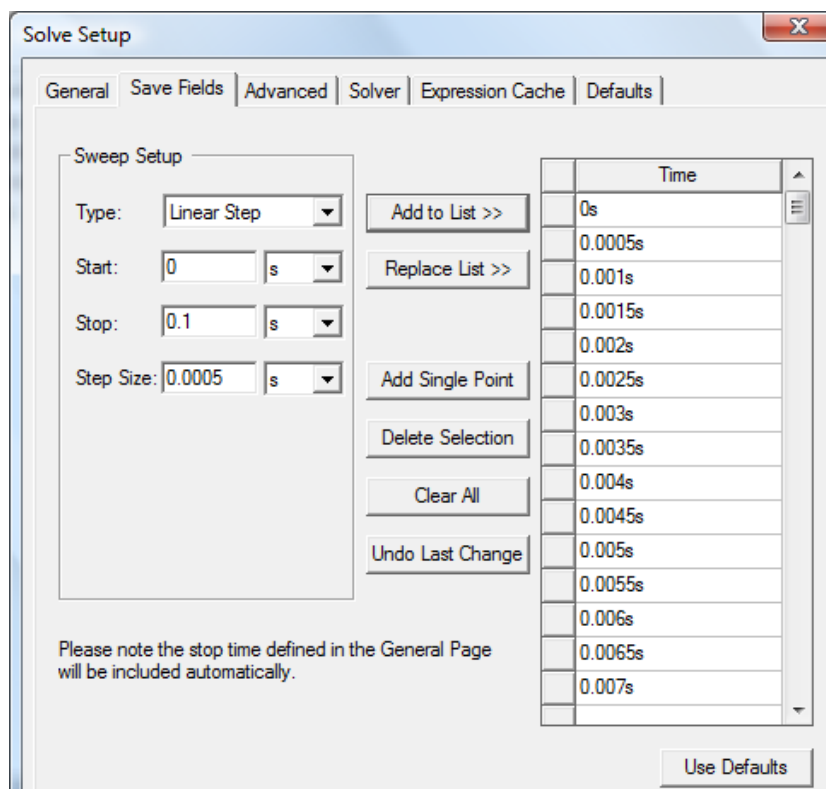


Figura 16: Opções de análise no cálculo dos campos e fluxos no Maxwell 2D

3.2.4 Results

Nesta aba, são escolhidos quais resultados da simulação serão exibidos e de que forma isso será feito, ou seja, além de se optar pelas grandezas a serem exibidas pode-se escolher se elas serão analisadas em função do tempo, da distância ou de algum outro parâmetro escolhido. Neste trabalho, as principais grandezas analisadas foram tensão e corrente em função do tempo. A opção “Field overlay” permite que sejam plotados gráficos dos campos, sejam as suas magnitudes em um plano cartesiano, ou sejam seus vetores mostrados diretamente no layout da máquina.

3.3 Maxwell Circuit Editor

Este programa é, como indicado no próprio nome, responsável por editar circuitos. Ele utiliza o dispositivo modelado no Maxwell 2D, edita o circuito que será conectado em seus terminais, mede as grandezas desejadas e as envia novamente ao Maxwell. Para isso, é preciso importar o arquivo gerado pelo Maxwell Circuit Editor para o campo de excitação da máquina presente no Maxwell 2D. Sua principal interface é mostrada na figura 17.

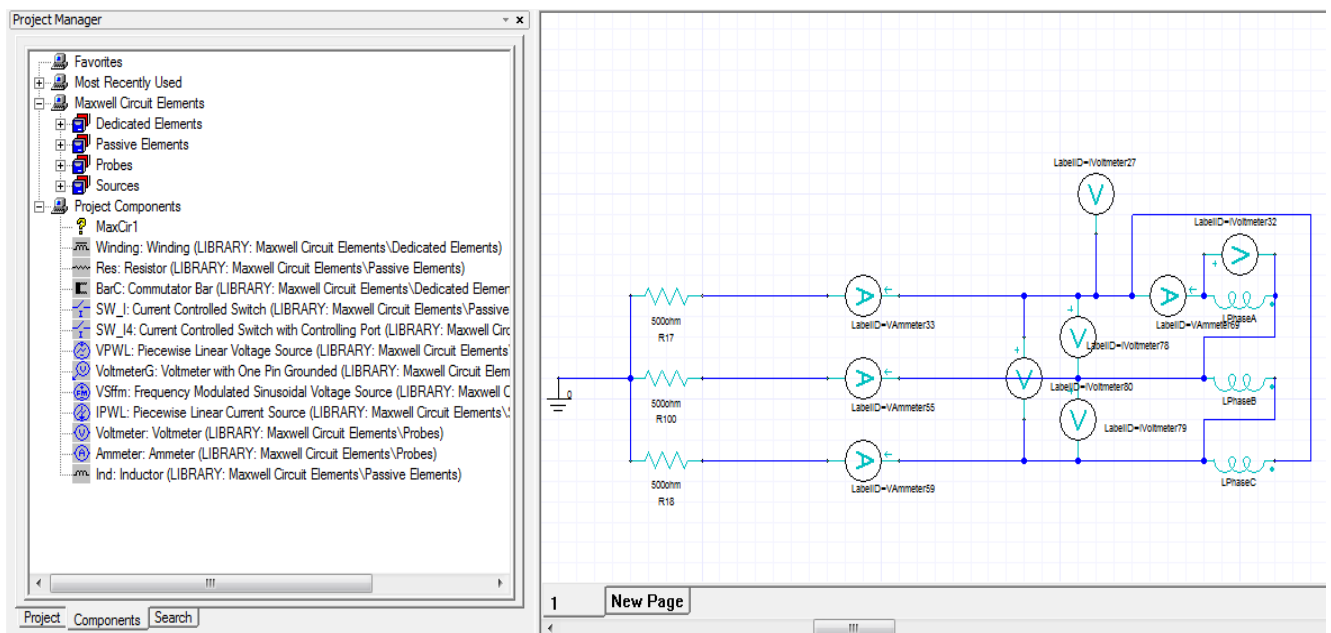


Figura 17: Interface principal do Maxwell Circuit Editor

4 Modelagem do Gerador em estudo

A biblioteca do programa RMXprt possui exemplos de modelos de diversas máquinas elétricas, entre elas a MSIP. A seguir será mostrada a influência de alguns aspectos construtivos da máquina (número de pólos, dimensão e número de ranhuras, dimensão do ímã) sobre a distribuição de fluxo e consequentemente, sobre a forma de onda da tensão gerada. Especificamente, serão feitas alterações de forma a se obter uma forma de onda o mais próximo possível de uma onda quadrada e para isso, serão tomadas ações com o objetivo de obter uma distribuição de fluxo mais concentrada.

4.1 Máquina Padrão

O modelo de Gerador Síncrono de Ímã Permanente (GSIP) padrão do RMXprt é uma máquina trifásica de 4 pólos, 60Hz, tensão nominal de 480V e que apresenta as seguintes características:

- Estator

Diâmetro interno de 75mm e diâmetro externo de 120mm. Possui 24 ranhuras de mesma dimensão. As bobinas são de passo pleno e a dimensão do condutor dos enrolamentos é desprezada. A figura 18 mostra como estão conectadas as fases no estator e as dimensões de cada ranhura.

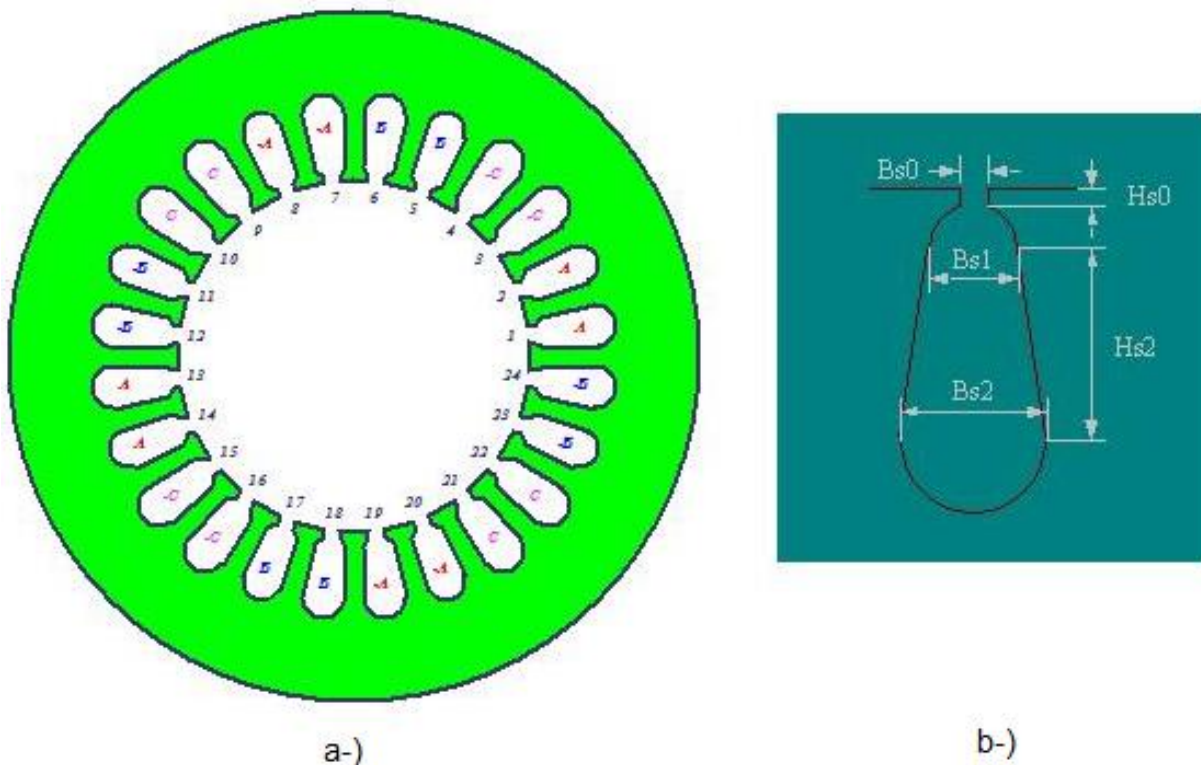


Figura 18: a-) Configuração do estator do GSIP padrão do RMXprt.
b-) Detalhe da ranhura, onde $Hs0 = 0,5\text{mm}$ - $Hs2 = 5\text{mm}$ - $Bs0 = 2,5\text{mm}$ - $Bs1 = 3\text{mm}$ - $Bs2 = 4\text{mm}$

- Rotor e ímã

O rotor possui diâmetro interno de 26mm e diâmetro externo de 74mm. É construído com aço laminado com fator de empilhamento de 0,95.

O ímã é de NdFeB fixado sobre o rotor. Possui 3mm de espessura e seus 4 pólos ocupam 70% do comprimento externo do rotor. A figura 19 mostra a representação do conjunto rotor-ímã e a curva BH do ímã. Vale ressaltar que a Figura 19b foi retirada da interface do RMXprt e que para traçá-la, o programa realiza extrapolações numéricas. Na prática não é possível obter valores tão altos de densidade de fluxo (acima de 1,5 Tesla) em um ímã permanente.

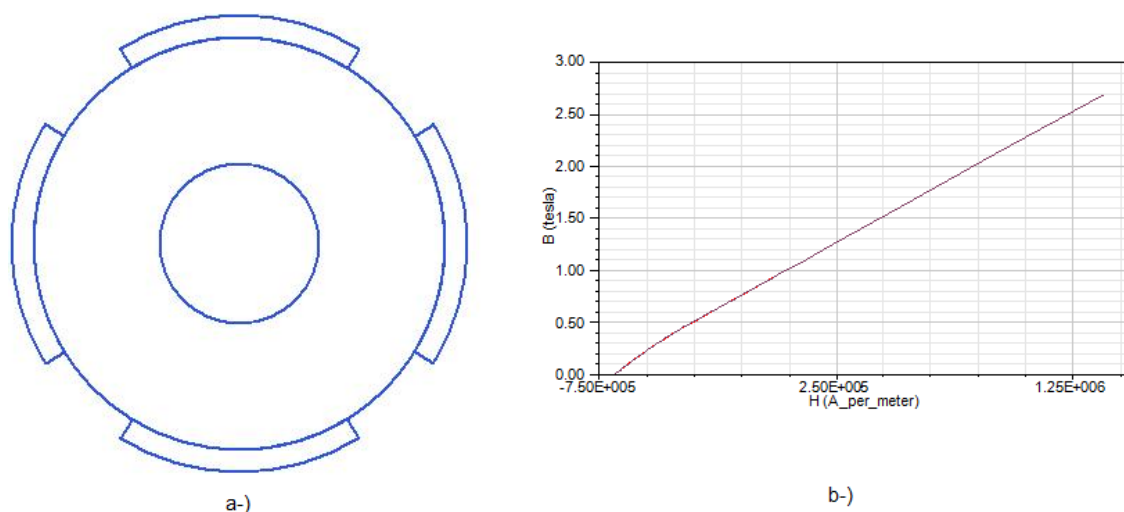


Figura 19: a-) Configuração do rotor com ímã do GSIP padrão do RMXprt.

b-) Curva BH do ímã

Uma vez finalizada a modelagem no RMXprt, criou-se o modelo do gerador no Maxwell. Para que haja um ganho na velocidade de processamento, o programa utiliza a menor simetria possível que seja capaz de representar todos os fenômenos que acontecem na máquina. Neste caso, ele representa $\frac{1}{4}$ do gerador, conforme mostra a figura 20:

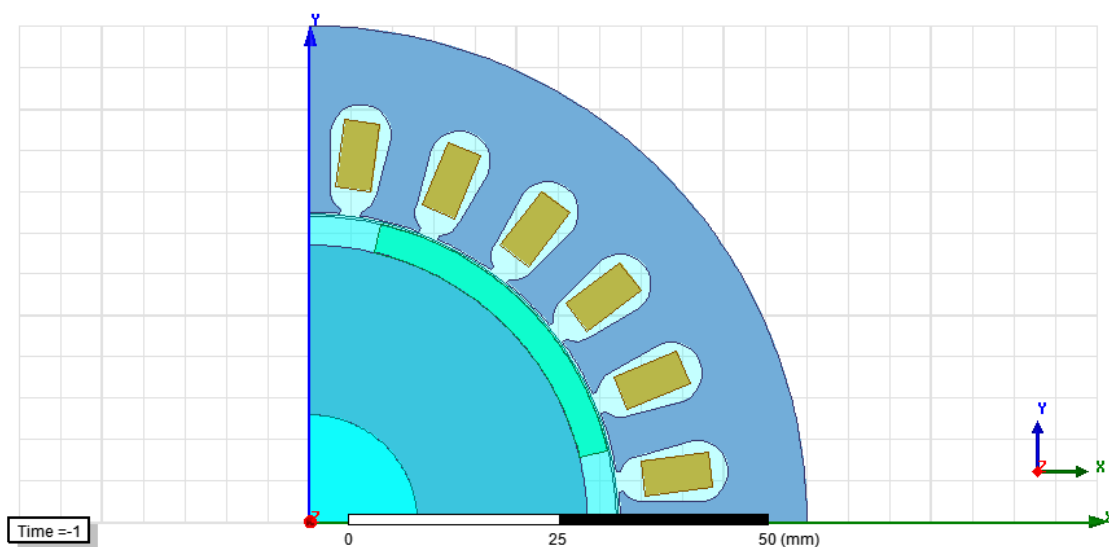


Figura 20: Modelo Maxwell do GSIP padrão do RMXprt

Utilizando o modelo Maxwell, foi simulado o funcionamento desta máquina girando à 1800rpm (60Hz) em circuito aberto, ou seja, corrente de armadura igual

a zero. As tensões induzidas no estator em cada uma das fases são mostradas na figura 21:

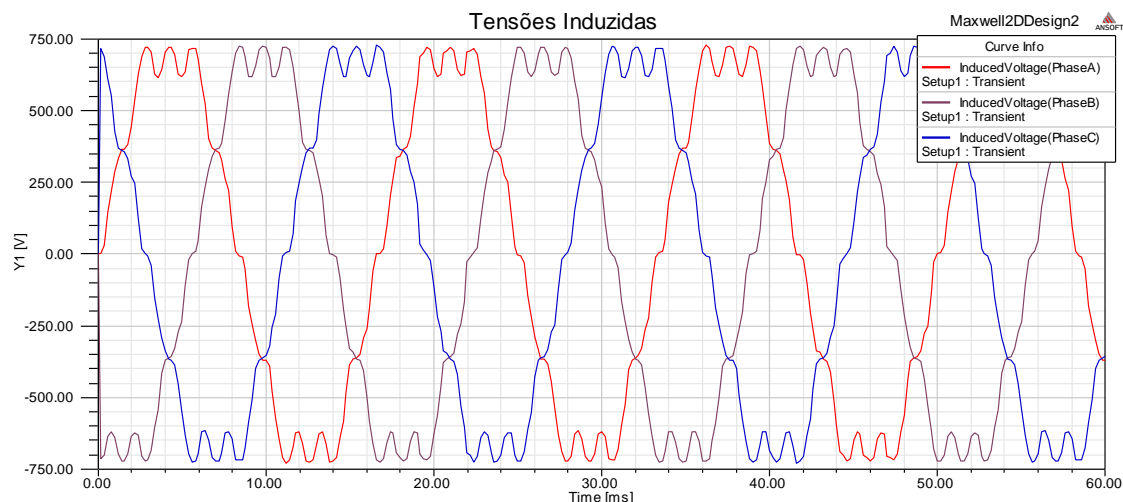


Figura 21: Tensões Induzidas no estator do GSIP padrão do RMXprt funcionando em circuito aberto

Notamos que as tensões induzidas possuem uma forma aproximadamente senoidal, o que é devido à distribuição uniforme dos enrolamentos no estator. Porém, para o objetivo deste trabalho é necessário uma forma de onda mais próxima de uma onda quadrada. Para isso, serão feitas modificações no modelo do RMXprt e analisados os seus impactos sobre o formato das tensões induzidas no estator.

4.2 Número de pólos

Muitos fatores devem ser levados em consideração na escolha do número de pólos de uma máquina, tais como o tipo de material magnético utilizado, tipo de rotor (interior ou exterior), forma mecânica do conjunto rotor-ímã, velocidade de rotação desejada e possíveis exigências em relação à inércia. Como regra básica tem-se que o número de pólos deve ser inversamente proporcional à velocidade de rotação, visando diminuir a frequência de comutação e consequentemente as perdas por chaveamento [6].

Há ainda o fator custo, uma vez que dependendo do tipo de material utilizado, como blocos de samário cobalto por exemplo, quanto maior o número de pólos maior o gasto com os ímãs e com o processo de fabricação.

Neste trabalho porém, esses critérios tradicionais não serão utilizados, visto que inicialmente o objetivo é analisar somente a forma de onda gerada pela máquina.

Portanto, partindo do modelo original da MSIP do RMXprt, somente o número de pólos foi alterado, de quatro para dois. Um novo modelo Maxwell foi então criado, conforme mostra a figura 22. Observamos que com esse novo formato, o programa precisa de uma nova simetria para representar a máquina e agora $\frac{1}{2}$ do gerador é mostrado.

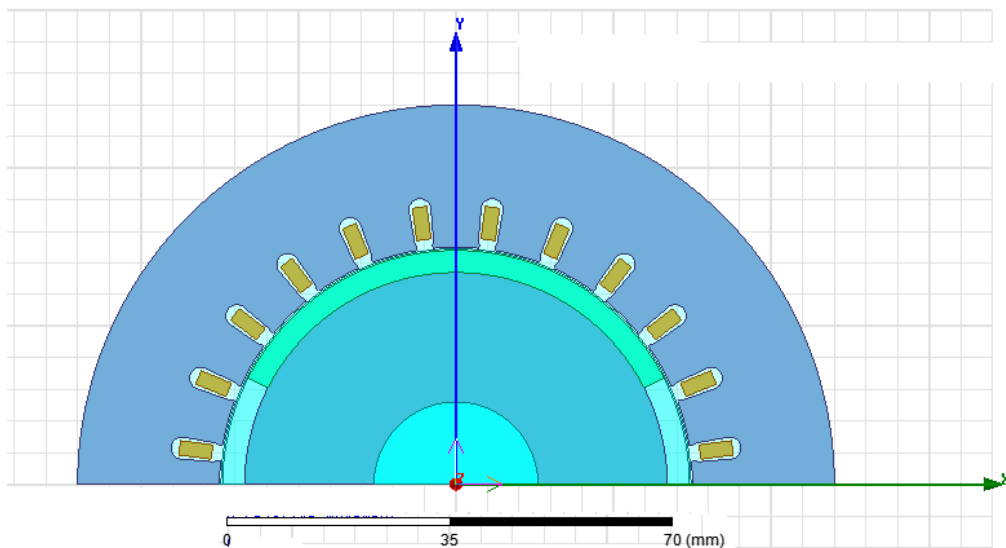


Figura 22: Modelo Maxwell do GSIP para a máquina de 2 pólos

Novamente foi utilizado o modelo Maxwell simulando o funcionamento desta máquina, agora girando à 3600rpm (60Hz), em circuito aberto. As tensões induzidas no estator em cada uma das fases são mostradas na figura 23.

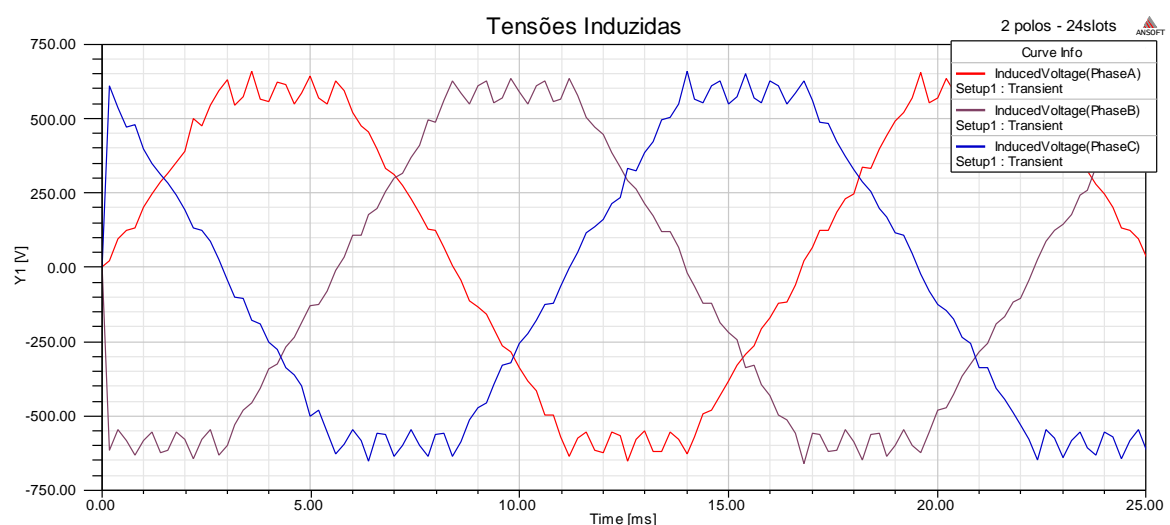


Figura 23: Tensões Induzidas no estator do GSIP com 2 pólos funcionando em circuito aberto

Em relação à máquina original, é possível notar uma grande mudança na tensão gerada. Conforme esperado, essa mudança não acontece em relação aos valores dos limites mínimos e máximos de tensão, mas sim na forma da onda.

Com a diminuição do número de pólos, a forma que era predominantemente senoidal, passa a ser trapezoidal. Porém, o ângulo de subida da onda está próximo à 45° e não de 90° como ocorre na onda quadrada. Portanto, novas modificações serão feitas visando modificar este ângulo.

4.3 Número de ranhuras

Existem diversas combinações possíveis entre o número de ranhuras e o número de pólos para a MSIP, dentre as quais a mais popular possui 12 ranhuras e 4 pólos [6]. Porém, visando a obtenção da forma de onda quadrada para a tensão gerada e levando-se em consideração o resultado obtido para a máquina de 2 pólos, o número de ranhuras foi reduzido de vinte e quatro para doze. Portanto, este novo modelo possui 2 pólos e 12 ranhuras, possuindo todas as demais características do modelo padrão. Vale ressaltar que neste trabalho, todos os modelos criados possuem ranhuras com camada simples. A figura 24 mostra o estator da máquina no RMXprt e o modelo Maxwell correspondente:

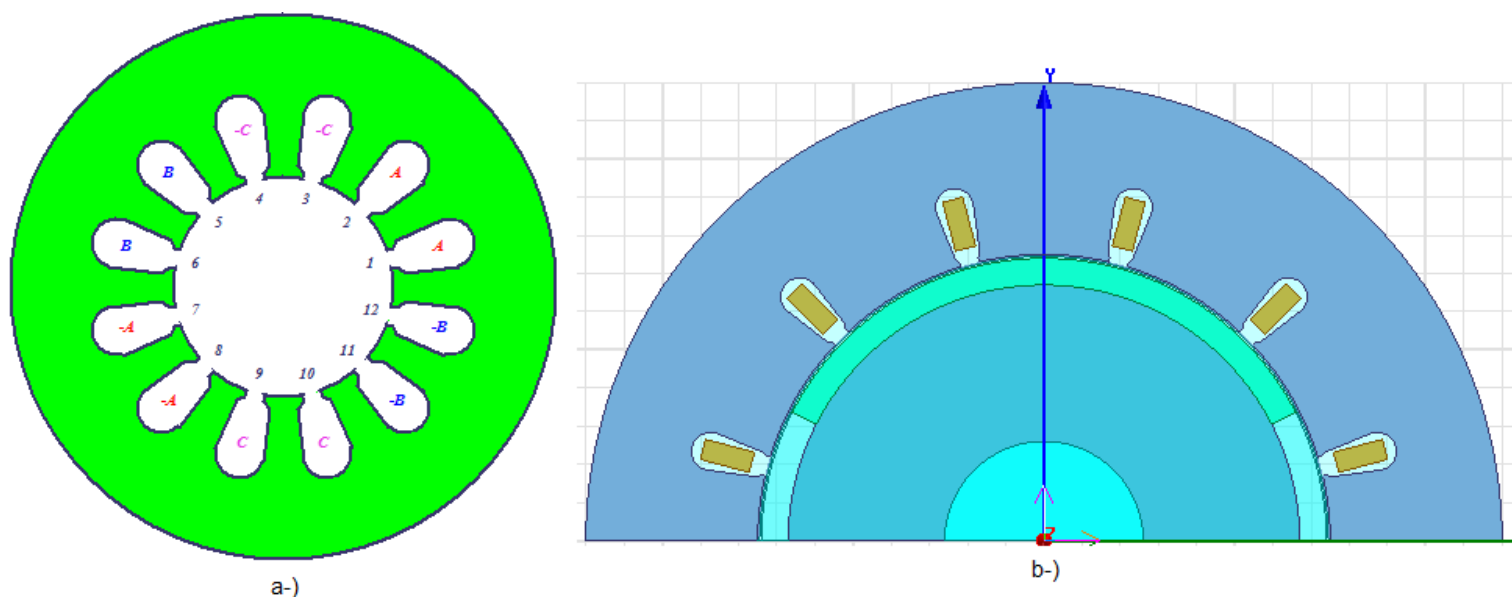


Figura 24: a-) Configuração do estator do GSIP com 2 pólos e 12 ranhuras do RMXprt.
b-) Modelo Maxwell para o GSIP com 2 pólos e 12 ranhuras.

Através desse modelo Maxwell, foi simulado o funcionamento desta máquina girando à 3600rpm (60Hz) em circuito aberto. As tensões induzidas no estator em cada uma das fases são mostradas na figura 25.

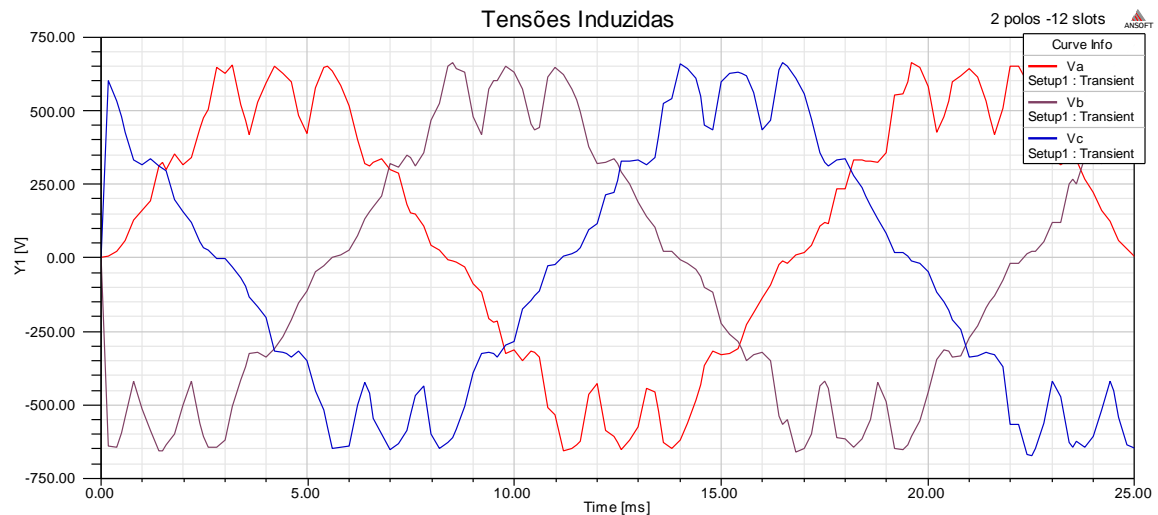


Figura 25: Tensões Induzidas no estator do GSIP com 2 pólos e 12 ranhuras funcionando em circuito aberto

Nota-se que, apesar da ondulação nas regiões de máxima e mínima tensão, a forma de onda ainda é predominantemente trapezoidal e houve um pequeno aumento no ângulo de subida, que por sua vez permanece longe dos 90° da onda quadrada.

Então, um novo modelo foi criado reduzindo novamente o número de ranhuras, agora de doze para seis, conforme mostrado na figura 26.

Vale ressaltar a nova distribuição dos enrolamentos de cada fase no estator que, anteriormente ocupavam diversas ranhuras, e agora ocupam somente duas, aumentando a concentração dos enrolamentos.

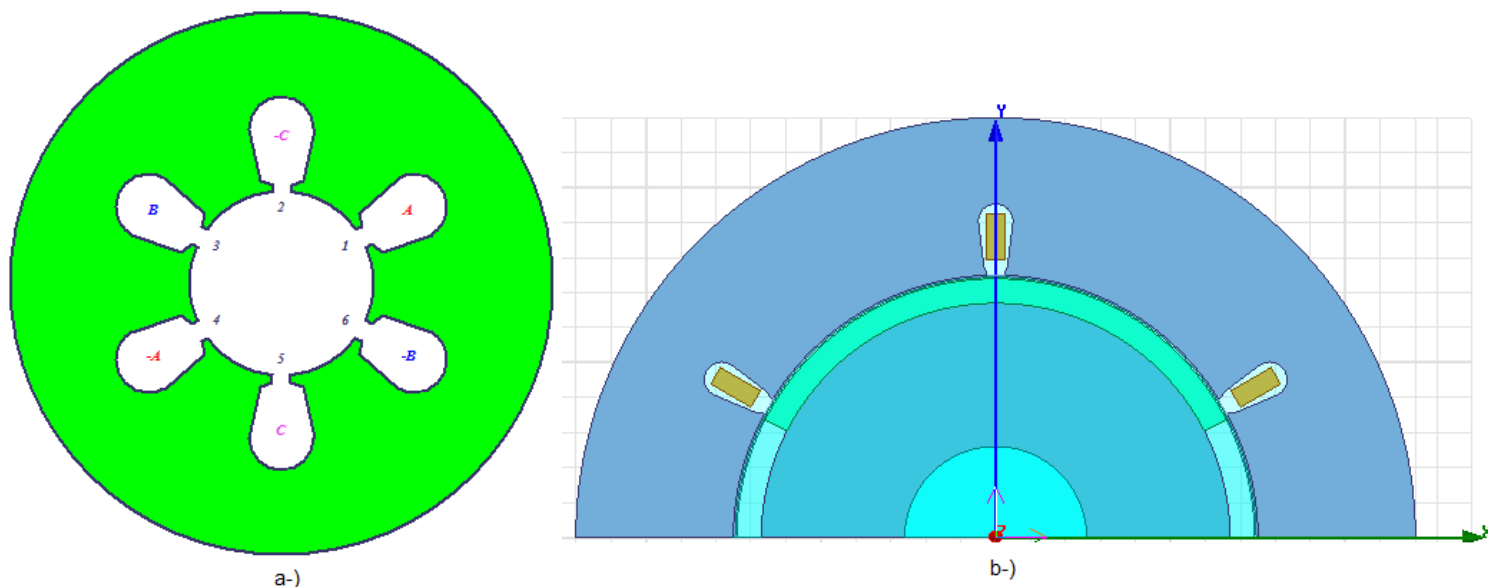


Figura 26: a-) Configuração do estator do GSIP com 2 pólos e 6 ranhuras do RMXprt.
b-) Modelo Maxwell para o GSIP com 2 pólos e 6 ranhuras

Na simulação do funcionamento desta máquina em circuito aberto, as seguintes tensões foram induzidas no estator:

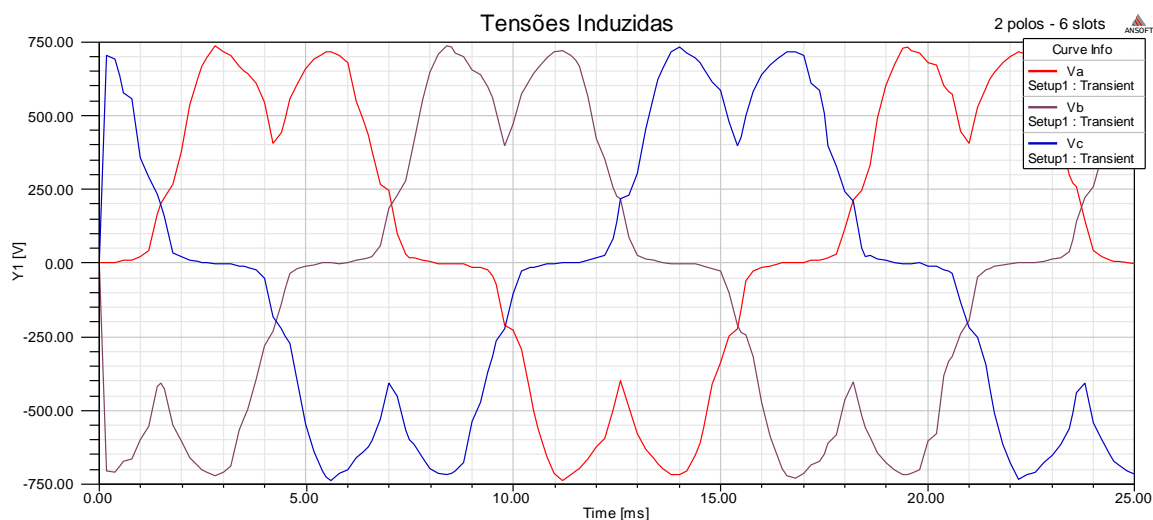


Figura 27: Tensões Induzidas no estator do GSIP com 2 pólos e 6 ranhuras funcionando em circuito aberto

Nesta configuração, conforme desejado, houve um significativo aumento do ângulo de subida da tensão. Porém, o tempo em que a tensão permanece igual a zero é muito grande, o que implicaria em uma menor potência gerada. Além disso, o formato de “dente” da curva nos pontos de máxima e mínima tensão representam um desperdício adicional de potência. Portanto, novas modificações são necessárias de forma a se obter a onda quadrada.

4.4 Dimensões das ranhuras

Um dos problemas apresentados na forma mostrada na figura 27 é a mudança no sinal da derivada da tensão nas regiões de máximo e de mínimo. Com o objetivo de entender a origem deste fenômeno, criou-se no modelo Maxwell da máquina uma linha que passe no meio do entreferro e possui comprimento de πR , onde R é a soma do raio externo do rotor mais metade do comprimento do entreferro. Assim, foi possível plotar um gráfico que tem no eixo das ordenadas o módulo das linhas de fluxo no entreferro e no eixo das abscissas a distância. A figura 28 mostra o resultado obtido:

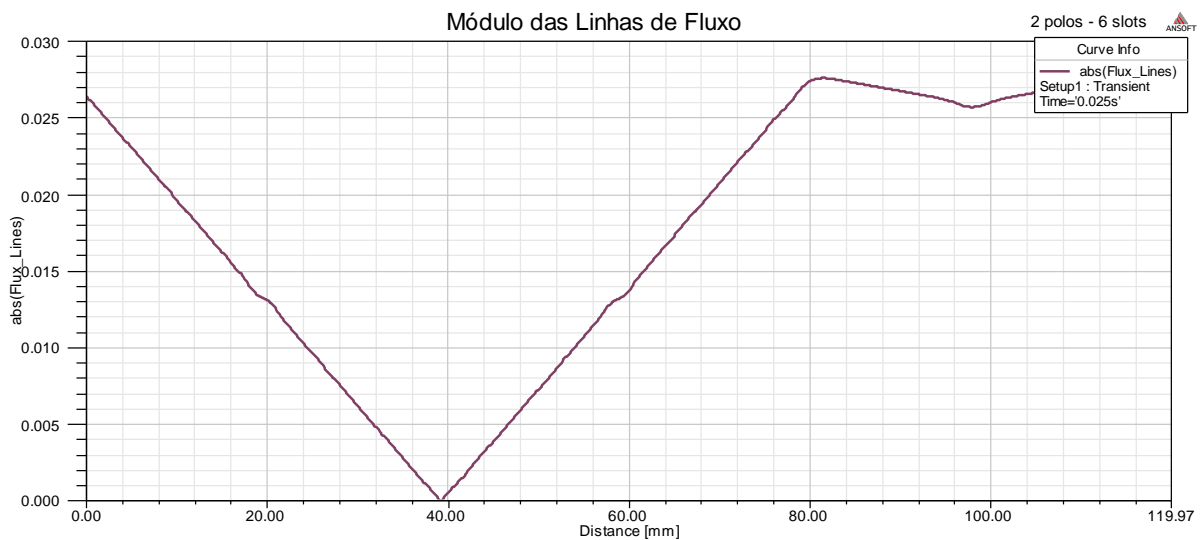


Figura 28: Módulo das linhas de fluxo X distância no entreferro do GSIP com 2 pólos e 6 ranhuras funcionando em circuito aberto

Nota-se que pequenas mudanças no sinal da derivada ocorrem por volta dos pontos de 18mm, 58mm e 98mm. Estes pontos correspondem à localização das ranhuras do estator. Por esta razão, optou-se por modificar o formato das ranhuras de forma a diminuir estes efeitos.

Na criação do modelo do GSIP no RMXprt, pode-se alterar as dimensões da ranhura através dos parâmetros Bs0, Bs1, Bs2, Hs0 e Hs2, conforme mostra a figura 29.

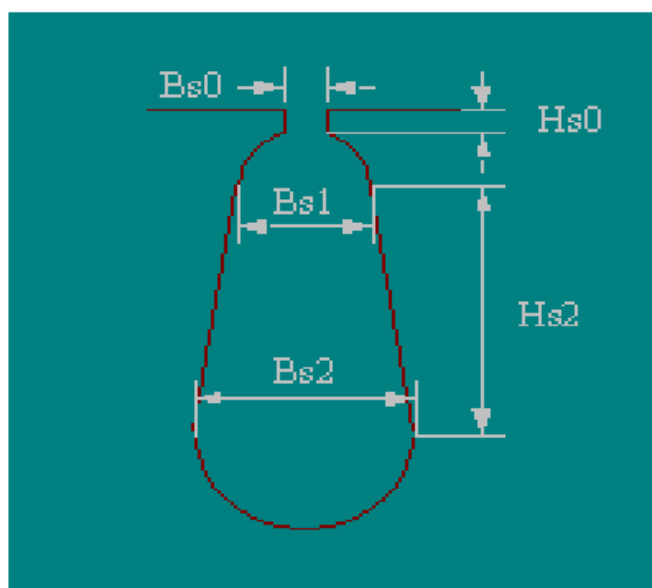


Figura 29: Parâmetros da ranhura no modelo do GSIP Np RMXprt

A partir da ranhura do modelo padrão, o valor de cada parâmetro foi alterado dando origem a novas configurações, que são explicitadas na tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros da ranhura no modelo do GSIP em diferentes configurações

	Configuração Padrão	Configuração 1	Configuração 2	Configuração 3
Bs0 (mm)	2,5	0,2	0,2	0,15
Bs1 (mm)	3	1,5	1,25	0,5
Bs2 (mm)	4	4	3	1,5
Hs0 (mm)	0,5	0,5	0,5	0,2
Hs2 (mm)	5	4	3	2

Para cada uma dessas configurações de ranhura, foi gerado um modelo de máquina Maxwell com 2 pólos e 6 ranhuras e foi simulado o seu funcionamento em circuito aberto. As tensões induzidas nos enrolamentos do estator são mostradas nas figuras 30, 31 e 32.

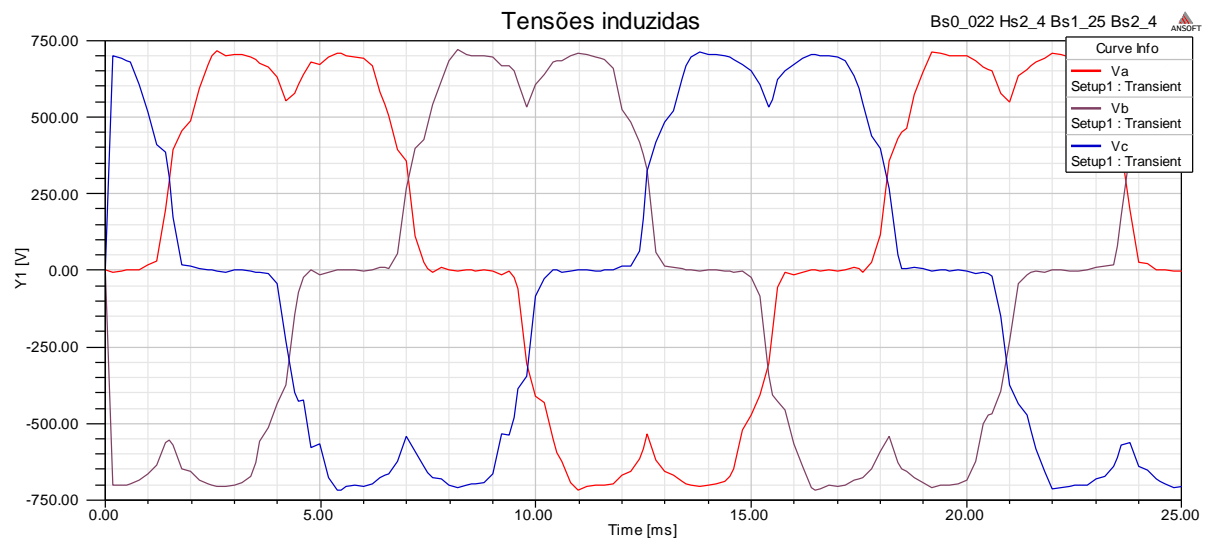


Figura 30: Tensões Induzidas no estator do GSIP da configuração 1 funcionando em circuito aberto

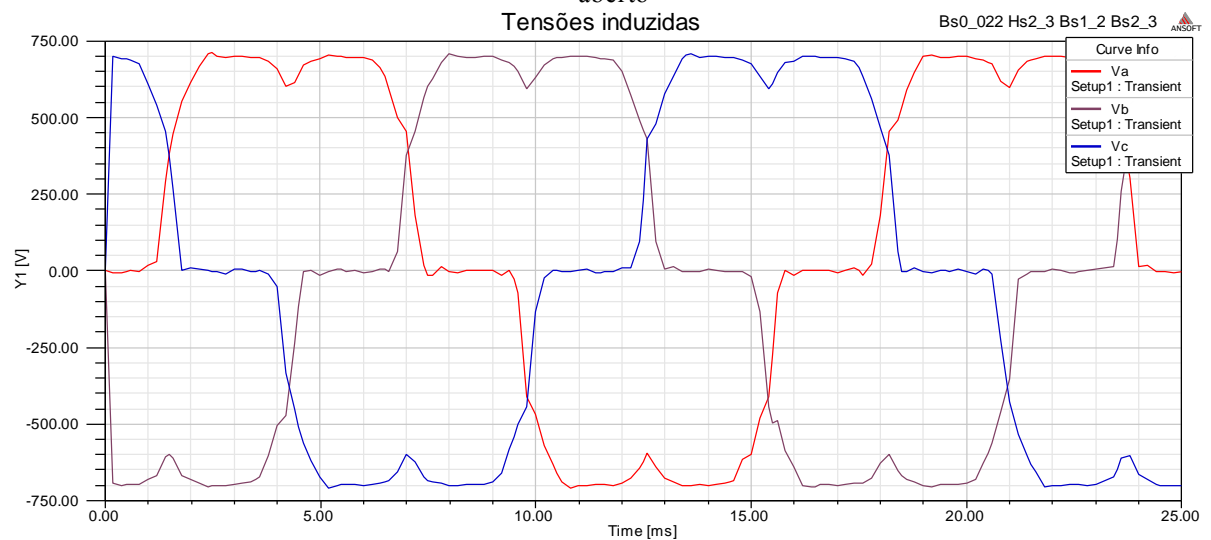


Figura 31: Tensões Induzidas no estator do GSIP da configuração 2 funcionando em circuito aberto

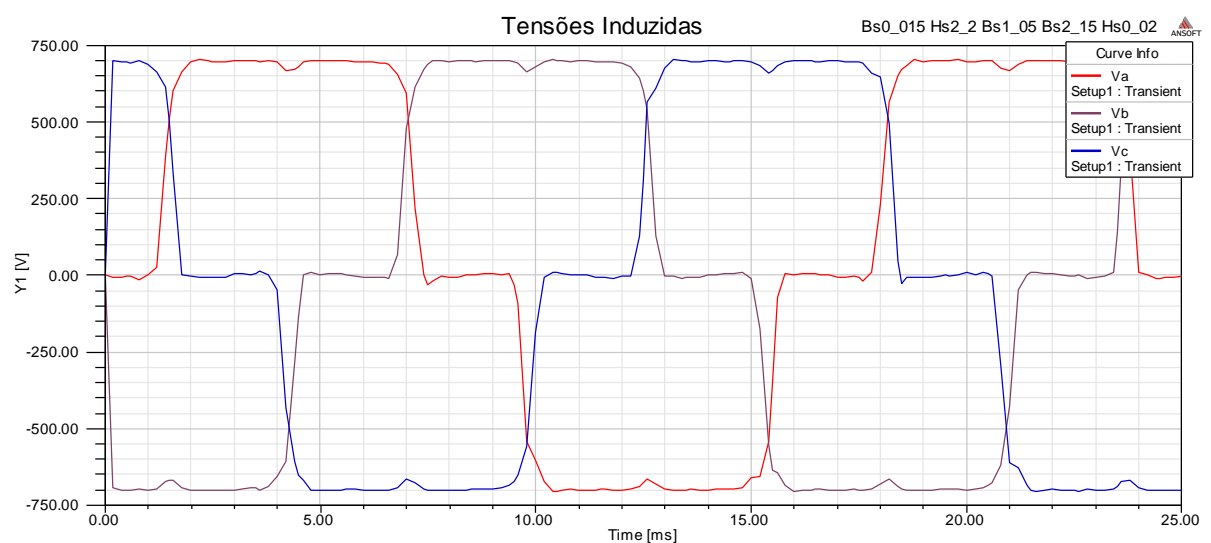


Figura 32: Tensões Induzidas no estator do GSIP da configuração 3 funcionando em circuito aberto

Percebe-se claramente a influência do formato das ranhuras sobre a forma da tensão gerada. Conforme as dimensões são reduzidas, concentrando ainda mais os enrolamentos, diminui significativamente o formato de “dente” presente no modelo original e o ângulo de subida é aumentado, resultando em uma onda próxima a uma onda quadrada.

Porém, para cada período de 16,66 ms da onda, durante aproximadamente 5ms ela é igual a zero. Este tempo ainda foi considerado longo e devem-se buscar maneiras de reduzi-lo.

4.5 Dimensões dos ímãs

Como próximo passo na busca da forma de onda quadrada e partindo do modelo da configuração 3 obtido no item anterior, as dimensões do ímã foram alteradas.

Originalmente, o ímã possuía 3 mm de espessura e ocupava 70% da superfície do rotor. Num primeiro momento alterou-se somente a espessura do ímã, que assumiu o novo valor de 3,8mm. Com esse modelo, a tensão induzida nos terminais da máquina operando a vazio é mostrada na figura 33.

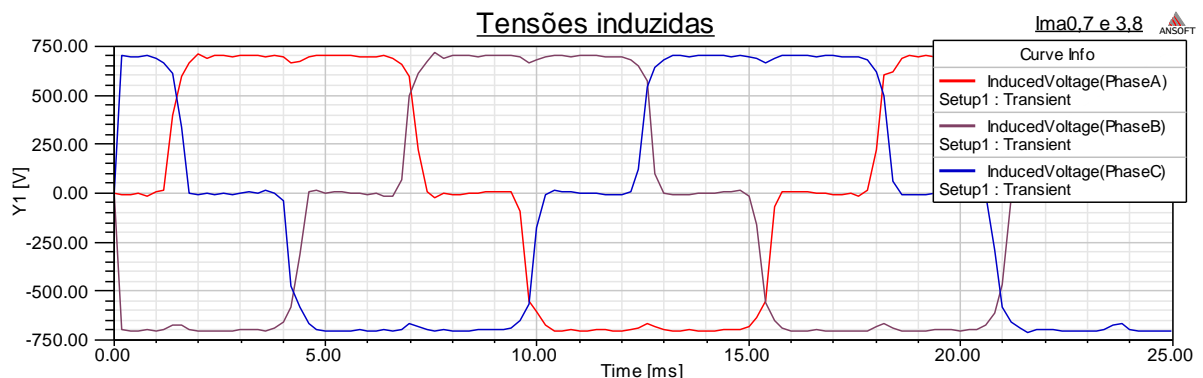


Figura 33: Tensões Induzidas no estator do GSIP da configuração 3 e com espessura de 3,8mm funcionando em circuito aberto

Nota-se que não houve mudanças significativas quando comparadas à figura 32. Como uma nova tentativa, criou-se um modelo de máquina com ímã de 3mm de espessura, mas agora com um comprimento tal que ocupe 80% da superfície do rotor.

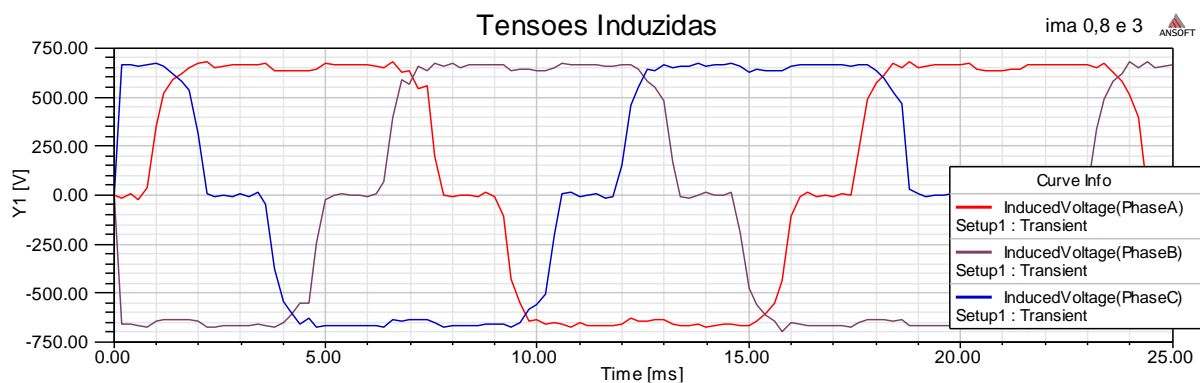


Figura 34: Tensões Induzidas no estator do GSIP da configuração 3 e com comprimento de 80% funcionando em circuito aberto

Analisando-se a figura 34, percebemos que houve uma diminuição no tempo em que a tensão é igual a zero. Isto é devido ao fato do ímã ocupar uma superfície maior, reduzindo o comprimento do entreferro e consequentemente, o tempo em que a variação de fluxo é nula. Porém, o tempo de valor nulo da tensão ainda é de aproximadamente 3ms.

Por esta razão, criou-se um novo modelo no qual o ímã ocupa 90% da superfície do rotor. Esta diferença no comprimento do ímã é facilmente percebida na figura 35:

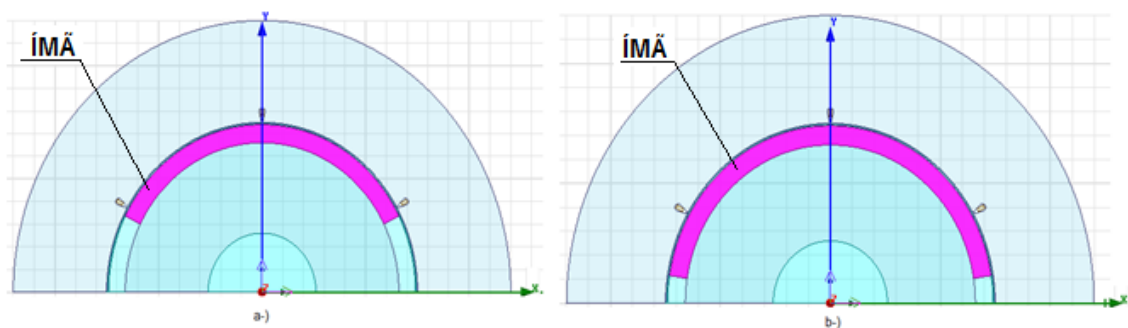


Figura 35: a-) Modelo Maxwell do GSIP com 2 pólos, 6 ranhuras e ímã com comprimento de 70%
b-) Modelo Maxwell do GSIP com 2 pólos, 6 ranhuras e ímã com comprimento de 90%

As novas formas de onda das tensões induzidas no estator são mostradas na figura 36.

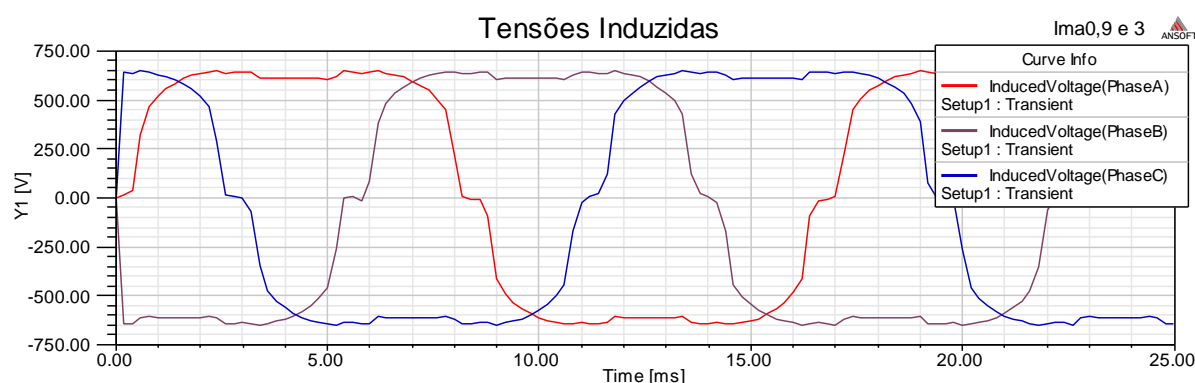


Figura 36: Tensões Induzidas no estator do GSIP da configuração 3 e com comprimento de 90% funcionando em circuito aberto

As tensões induzidas no estator desta máquina apresentam uma redução substancial do tempo em que a tensão possui valor nulo e está suficientemente próxima de uma onda trapezoidal com alto ângulo de subida. Portanto, esta será a configuração de máquina utilizada na comparação com a máquina do modelo original. A tabela 2 apresenta as principais características de cada um dos modelos que serão comparados.

Tabela 2: Principais parâmetros dos modelos do GSIP : Máquina de onda senoidal e Máquina de onda trapezoidal

	Modelo de máquina Padrão do GSIP (Onda senoidal)	Modelo de máquina Modificado do GSIP (Onda trapezoidal)
Tensão Nominal (V)	480	480
Frequencia Nominal (60Hz)	60	60
Número de Pólos	4	2
Número de Ranhuras	24	6
Dimensões das Ranhuras	Hs0= 0,5mm / Hs2=5mm Bs0=2,5mm/Bs1=3mm/Bs2=4mm	Hs0=0,2mm / Hs2=2mm Bs0=0,15mm / Bs1=0,5mm / Bs2=1,5mm
Dimensões do Ímã (espessura/comprimento)	3mm / 70%	3mm / 90%

As tensões induzidas no estator quando cada uma das máquinas opera a vazio são mostradas na figura 37.

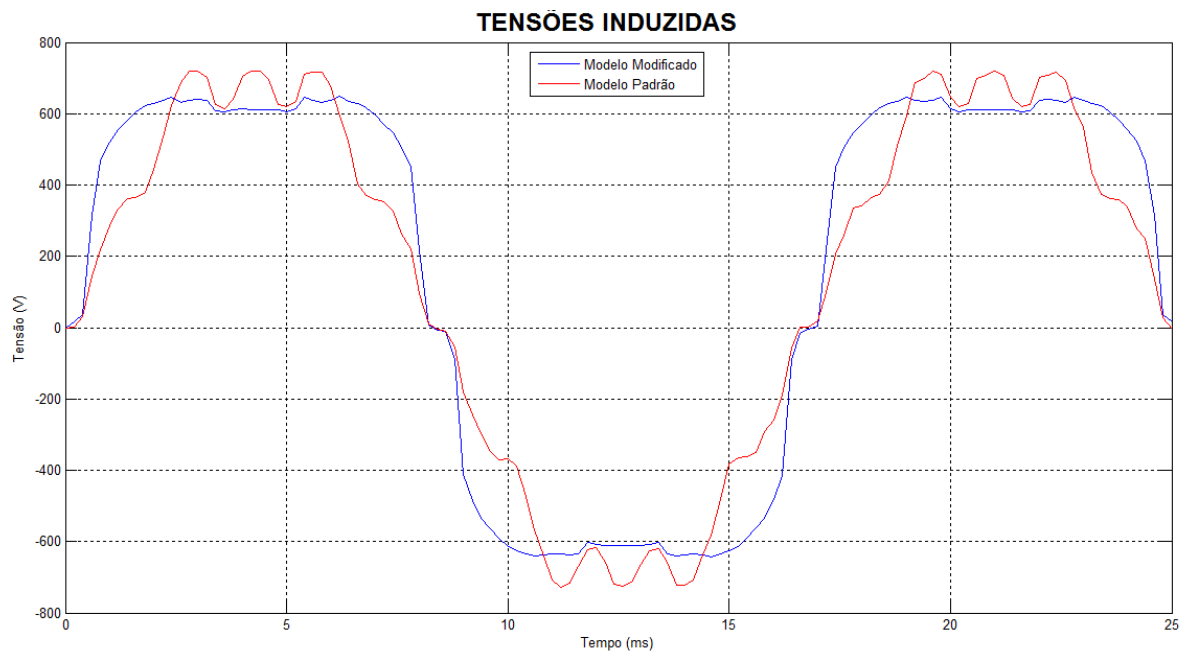


Figura 37: Tensões Induzidas no estator do GSIP do modelo padrão e do modelo modificado operando em circuito aberto

5 Comparação dos modelos

Para analisar o efeito da forma de onda da tensão induzida nos enrolamentos do estator sobre a potência gerada pelo GSIP, serão utilizados dois modelos de máquinas obtidos anteriormente. O primeiro, que aqui será chamado de máquina padrão, é o modelo de MSIP presente na biblioteca do RMXprt e que gera uma tensão com forma de onda predominantemente senoidal. O segundo será chamado de máquina modificada e corresponde ao último modelo desenvolvido no capítulo 4, possuindo uma forma de onda predominantemente trapezoidal.

Ambas as máquinas serão conectadas a diversas resistências, simulando uma geração que atenda vários níveis de carga. Além disso, os enrolamentos das máquinas serão conectados de três formas diferentes: delta, estrela aterrado e estrela não aterrado, a fim de verificar a influência da conexão da máquina sobre a forma de onda da tensão gerada. Em seguida, os resultados obtidos serão comparados para que se possa verificar qual tipo de conexão favorece o ganho de potência esperado para a máquina trapezoidal.

5.1 Ligação em delta

Utilizando-se o programa Maxwell Circuit Editor da Ansoft, foi possível conectar as máquinas modeladas no Maxwell a um circuito externo, que nesse caso é um banco de resistores ligados em estrela, conforme mostra a figura 38.

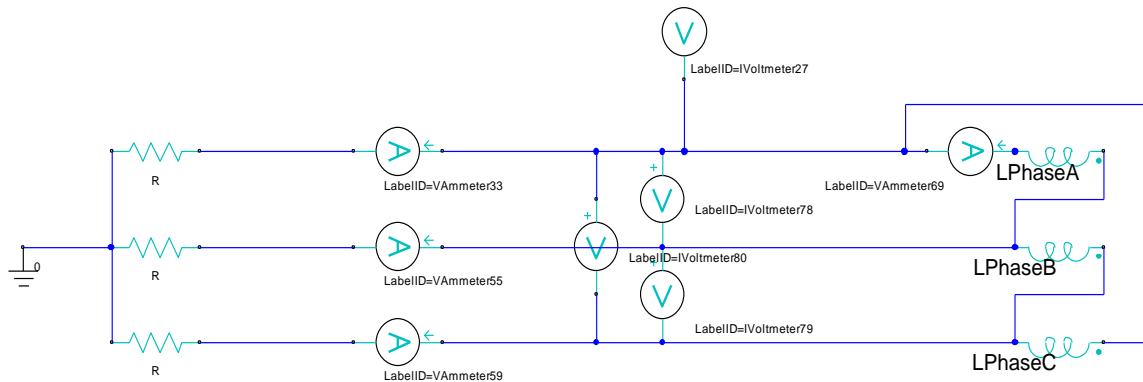


Figura 38: Circuito do GSIP conectado em delta

Neste circuito, os elementos chamados de LPhaseA, LPhaseB e LPhaseC correspondem aos enrolamentos de cada fase do gerador. Eles estão conectados em delta e seguindo a convenção utilizada no programa, que diz que a corrente flui a partir do terminal marcado com o ponto em direção ao terminal sem marcação. Portanto, os enrolamentos foram conectados de forma a injetar potência no circuito.

Os elementos chamados de R formam o banco de resistores de igual valor ligados em estrela aterrado. Os demais elementos são amperímetros e voltmímetros por meio dos quais pode-se observar, na interface do Maxwell, as formas de onda de corrente e tensão.

As resistências tiveram seus valores variados de 10Ω a 1000Ω e para cada um deles foi simulado o funcionamento da máquina padrão e da máquina modificada. As figuras 39 e 40 mostram os resultados da fase A , tensão e corrente de linha de ambos os modelos, para $R=100\Omega$.

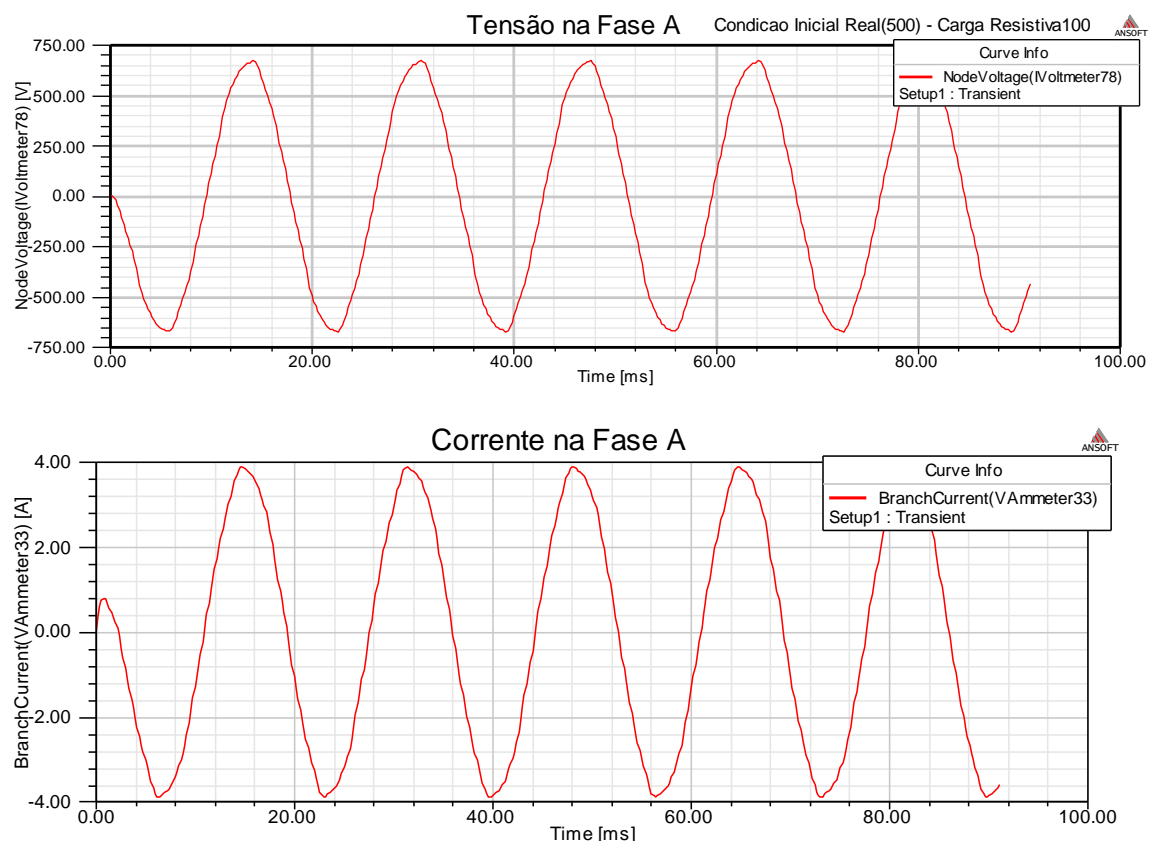


Figura 39: Tensão e corrente de linha para a máquina padrão conectada em delta com $R=100\Omega$

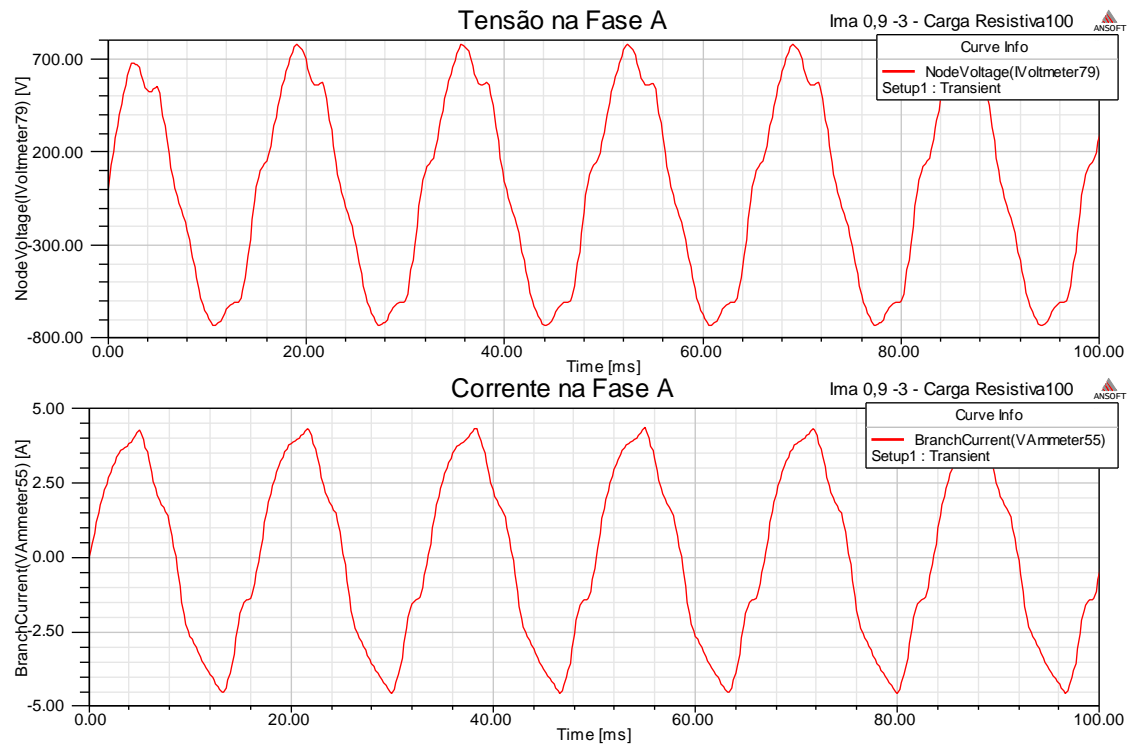


Figura 40: Tensão e corrente de linha para a máquina modificada conectada em delta com $R=100\Omega$

Nota-se claramente que a tensão e a corrente no caso da máquina padrão possuem a forma senoidal. Este resultado era esperado, uma vez que a distribuição dos enrolamentos dessa máquina é projetada de tal maneira que ela gere uma tensão cuja forma de onda seja o mais próxima possível de uma senóide. Já no caso da máquina modificada, as tensões e correntes não são senoidais e nem perfeitamente trapezoidais, mas sofrem a influência de harmônicos, sobretudo de 3ª ordem, que estão presentes nas tensões de linha devido à conexão em delta e que fazem com que haja as distorções observadas na figura 40.

Todos os dados referentes às formas de onda de tensão e corrente obtidas nas simulações no Maxwell foram passados para o MATLAB, e então, foram calculados os valores médio e RMS dessas grandezas, conforme mostra a tabela 3, onde:

- I_{LRMS} : é o valor RMS da corrente de linha da fase A
- V_{LRMS} : é o valor RMS da tensão de linha na fase A
- *Potência*: é o valor da potência fornecida pela máquina e é igual à

$$\sqrt{3} * I_{LRMS} * V_{LRMS}$$

- *Diferença*: é a diferença percentual da potência de saída na comparação entre os modelos, sendo calculada como $\frac{PotênciaModeloModificado - PotênciaModeloPadrão}{PotênciaModeloPadrão} * 100$

Tabela 3: Valores de tensão, corrente e potência na conexão em delta

CARGA (ohms)	MÁQUINA	IL RMS (A)	VL RMS (V)	POTÊNCIA (kW)	DIFERENÇA (%)
1000 -fp1	Modelo Padrão	0,2999	513,3855	0,2667	
	Modelo Modificado	0,3248	563,0306	0,3167	18,7758
500 -fp1	Modelo Padrão	0,5872	518,2700	0,5271	
	Modelo Modificado	0,6508	559,4709	0,6306	19,6418
300 -fp1	Modelo Padrão	0,9505	499,5886	0,8225	
	Modelo Modificado	1,0240	533,2600	0,9458	14,9938
200 -fp1	Modelo Padrão	1,4188	486,3380	1,1951	
	Modelo Modificado	1,5070	524,3200	1,3686	14,5118
150 -fp1	Modelo Padrão	1,8932	483,1000	1,5841	
	Modelo Modificado	2,0175	531,9700	1,8589	17,3457
100 -fp1	Modelo Padrão	2,6910	466,2576	2,1732	
	Modelo Modificado	2,9540	511,5700	2,6174	20,4414
75 - fp1	Modelo Padrão	3,3750	438,5800	2,5638	
	Modelo Modificado	3,6850	438,5800	2,7993	9,1852
60 - fp1	Modelo Padrão	3,8865	408,9378	2,7528	
	Modelo Modificado	4,0648	437,0700	3,0772	11,7826
50 - fp1	Modelo Padrão	4,4220	383,0503	2,9338	
	Modelo Modificado	4,6991	413,1300	3,3625	14,6112
30 - fp1	Modelo Padrão	5,3400	277,7000	2,5685	
	Modelo Modificado	5,6500	293,9800	2,8769	12,0080
10 - fp1	Modelo Padrão	6,2500	108,3800	1,1732	
	Modelo Modificado	6,4550	111,8200	1,2502	6,5581

A análise da tabela 3 mostra que há um aumento de potência na máquina modificada quando comparada à máquina padrão. Este aumento varia entre aproximadamente 6% e 20% para os vários valores de carga, porém é sempre positivo, ou seja, a máquina modificada apresentou maior potência que a máquina padrão em todos os casos.

Nota-se também que, conforme o valor da corrente aumenta, o valor da tensão gerada diminui. Para explicar este fato, deve-se observar o comportamento do fluxo no entreferro.

O fluxo depende da resultante das contribuições do ímã e da corrente de armadura, que por sua vez possui ação desmagnetizante. Logo, o aumento da corrente de armadura faz com que haja uma diminuição do fluxo total no entreferro, resultando em uma diminuição no valor da tensão gerada pela máquina.

Para observar este fenômeno, foi plotado no Maxwell um gráfico que tem no eixo das ordenadas o módulo da densidade de fluxo magnético e no eixo das abscissas a distância que corresponde ao comprimento do entreferro. O programa traça um arco imaginário ao longo do entreferro e calcula, para cada ponto desse arco, o valor do fluxo magnético. Devido à simetria, somente metade da máquina é representada no Maxwell, portanto, este arco possui aproximadamente 120mm de comprimento, o que equivale a 180° mecânicos.

Foram analisados os casos da máquina modificada para carga igual a 50Ω e a 1000Ω , mostrados na figura 41.

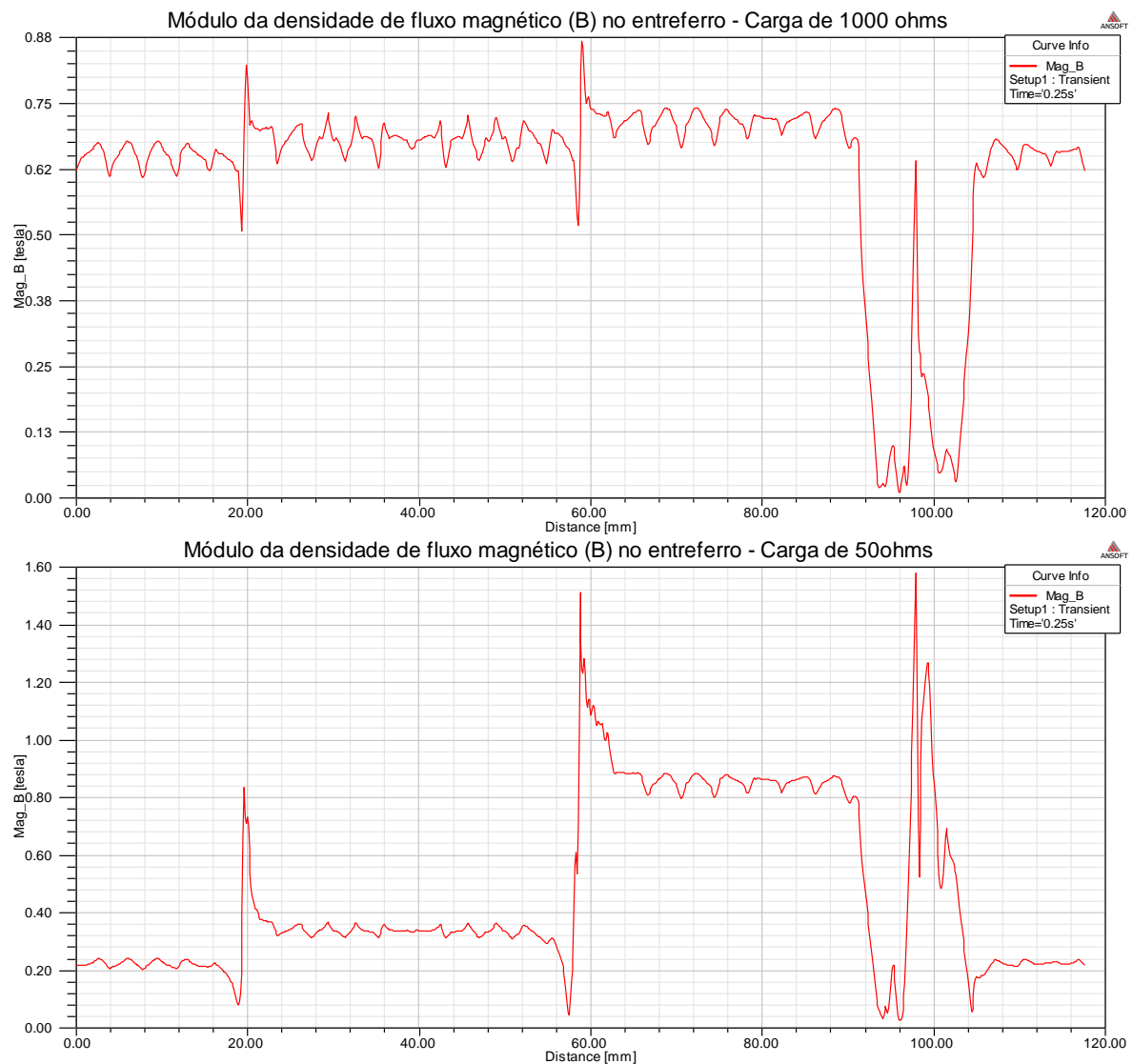


Figura 41: Módulo da densidade de fluxo magnético no entreferro para cargas de 1000Ω e 50Ω na conexão em delta

De acordo com a tabela 3, quando a carga é de 1000Ω a corrente possui seu menor valor, 0,3248A. Quando a carga é de 50Ω a corrente é praticamente 15 vezes maior, 4,7991A. Paralelamente, observa-se na figura 41 que o módulo da densidade de fluxo no entreferro no primeiro caso é maior do que no segundo para toda a extensão do entreferro, comprovando a relação entre a corrente de armadura e a queda no valor da tensão gerada.

Vale ressaltar que nas posições de 18mm, 58mm e 98mm estão localizadas as ranhuras representadas no equivalente da máquina em meia circunferência (Figura 26.b). Devido à defasagem das ondas, essas ranhuras apresentam valores diferentes de corrente para um mesmo instante de tempo e por isso, apresentam diferentes valores de fluxo magnético.

A fim de se obter uma comparação mais realista em termos de rendimento, foi calculada também a potência no eixo da máquina fazendo o produto do torque (N.m) pela velocidade de rotação (rad/s) para cada instante de tempo simulado. Os resultados obtidos são mostrados na tabela 4. Neste cálculo adotou-se rendimento (η) como sendo igual a razão entre a potência obtida nos terminais da máquina (resultados mostrados na tabela 3) e a potência no eixo.

Tabela 4: Potência no eixo das máquinas e rendimento na conexão em delta

CARGA (ohms)	MÁQUINA	Potência no eixo (N.m.rad/s)	Rendimento η (%)
1000 -fp1	Modelo Padrão	299,550	89,025
	Modelo Modificado	344,440	91,959
75 - fp1	Modelo Padrão	2660,631	96,360
	Modelo Modificado	2901,150	96,489
50 - fp1	Modelo Padrão	3000,087	97,792
	Modelo Modificado	3399,860	98,901
10 - fp1	Modelo Padrão	1259,300	93,167
	Modelo Modificado	1296,000	96,465

Podemos observar que a máquina modificada apresenta um rendimento maior quando comparada à máquina padrão, chegando em um dos casos a 3%.

Para verificar se havia alguma alteração nos resultados obtidos em função do fator de potência da carga, foram plotados alguns casos em que as cargas eram formadas por resistências e indutâncias, porém sem alterar o módulo total. Por exemplo, para a carga inicial de 100Ω utilizou-se $R=90\Omega$ e $L=115\text{mH}$, o que resulta em uma impedância total de aproximadamente 100Ω . Entretanto, nenhuma mudança significativa foi notada, a não ser pelo fato da corrente levar mais tempo para alcançar o regime permanente, conforme mostra a figura 42. Porém, isso é devido ao efeito da indutância no circuito.

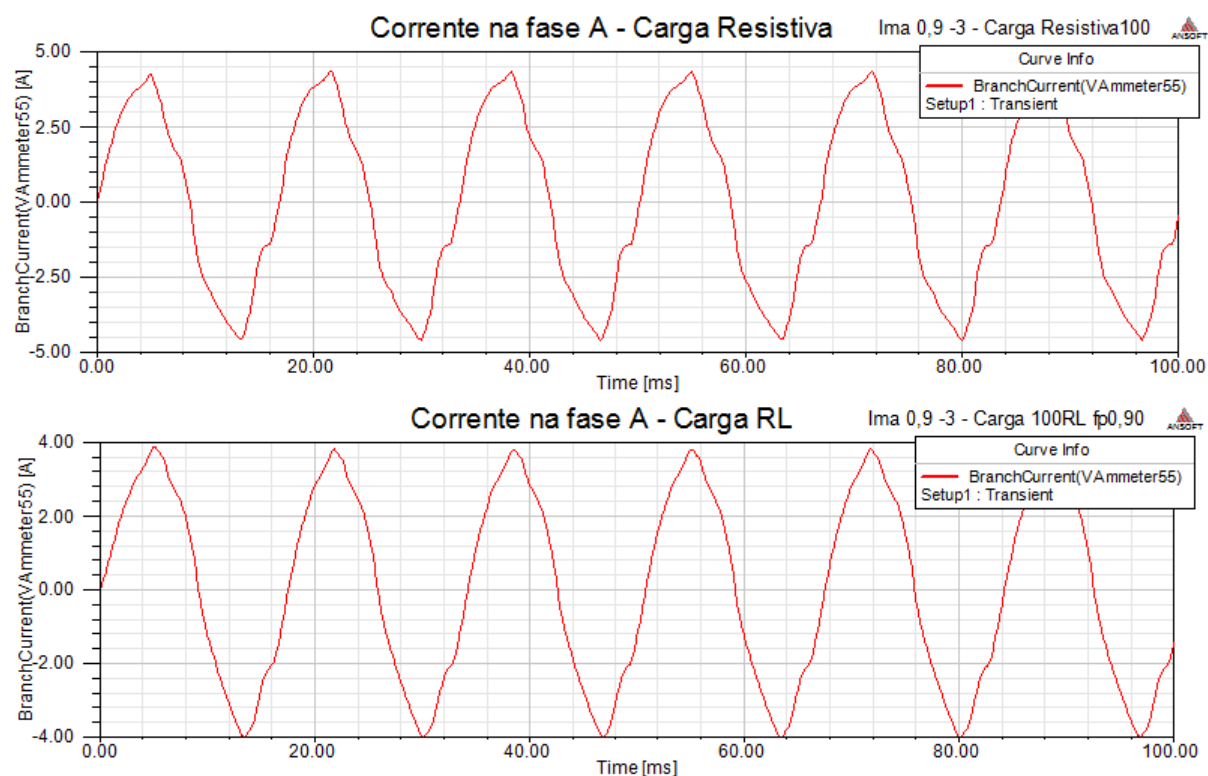


Figura 42: Formas de corrente da fase A para cargas Resistiva e RL de 100Ω na conexão em delta para a máquina modificada

A partir da tabela 3, pode-se analisar a relação da potência gerada em função da carga, conforme mostrado na figura 43:

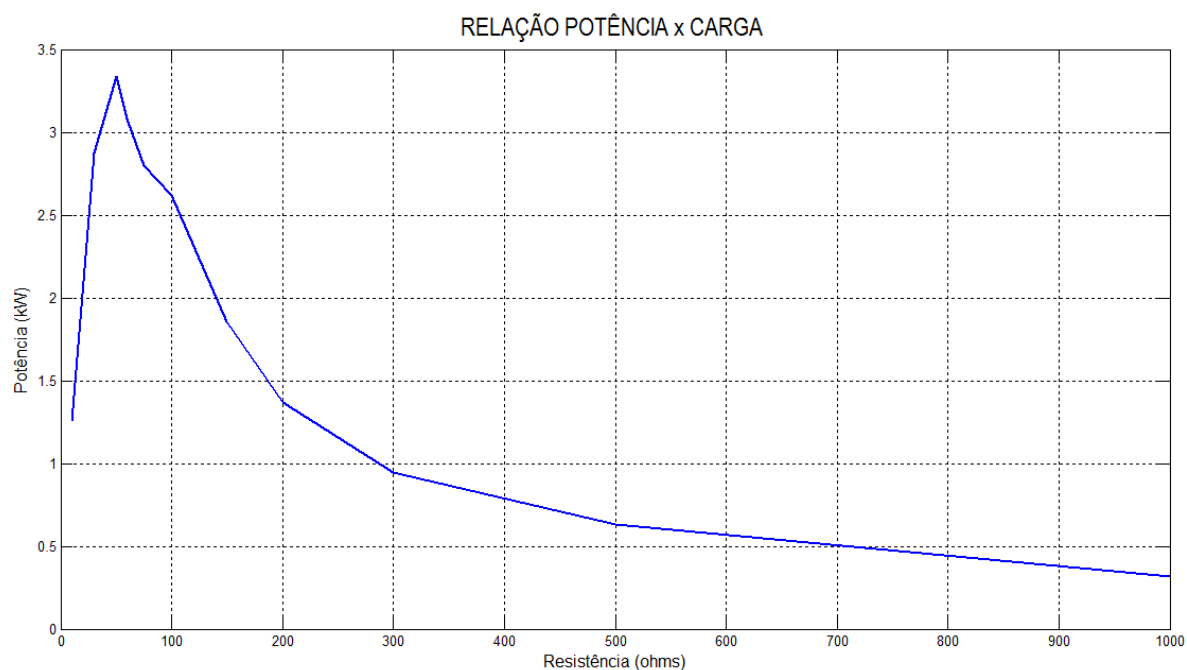


Figura 43: Relação Potência x Carga para conexão em delta

Conforme esperado, a relação entre a potência fornecida pelo gerador e a carga resulta em uma curva que é crescente até atingir o ponto de máxima potência, quando a curva passa a ser decrescente e o aumento da carga não implica em aumento na potência fornecida. Esse ponto é função da tensão e da impedância equivalente da fonte vista pela carga. Neste caso, a máxima potência transferida ocorre quando o valor da carga é próximo de 50Ω .

5.2 Ligação em estrela aterrado

Utilizando o programa Maxwell Circuit Editor da Ansoft, as máquinas modeladas no Maxwell tiveram seus enrolamentos conectados em estrela aterrado e foram conectadas a um circuito externo formado por um banco de resistores ligados em estrela, conforme mostra a figura 44.

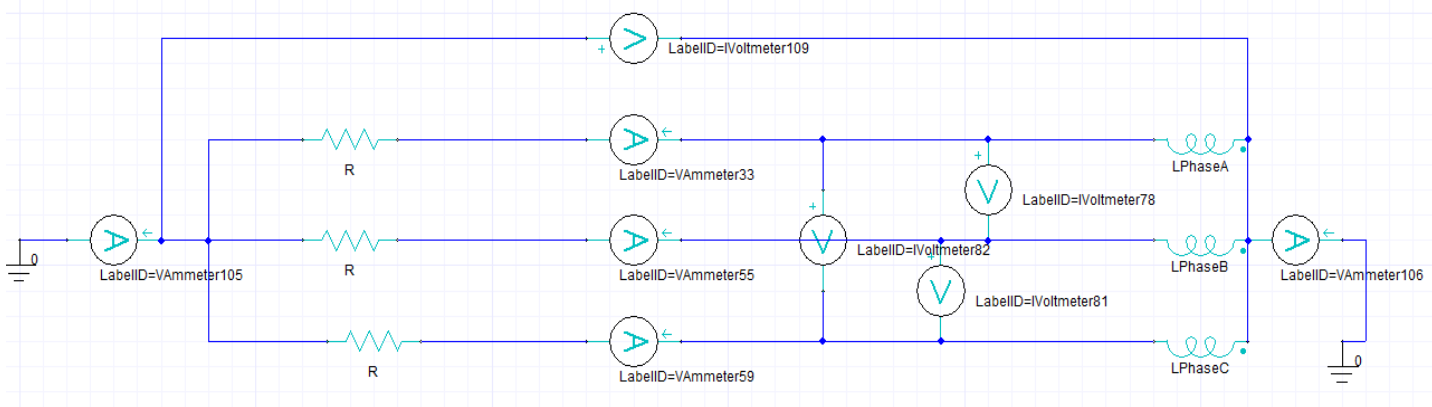


Figura 44: Circuito do GSIP conectado em estrela aterrado

Neste circuito, os enrolamentos da máquina (LPhaseA, LPhaseB e LPhaseC) são conectados em estrela aterrado respeitando a convenção do programa de forma a injetar potência no circuito. Os voltmíetros e amperímetros foram colocados para, além de calcular a potência do circuito, monitorar a corrente e tensão no neutro, que idealmente devem ser iguais à zero.

Os elementos chamados de R formam o banco de resistores de igual valor ligados em estrela aterrado. Eles tiveram seus valores variados de 10Ω a 1000Ω e para cada um deles foi simulado o funcionamento da máquina padrão e da máquina modificada. As figuras 45 e 46 mostram os resultados da fase A, tensão e corrente de linha de ambos os modelos, para $R=100\Omega$.

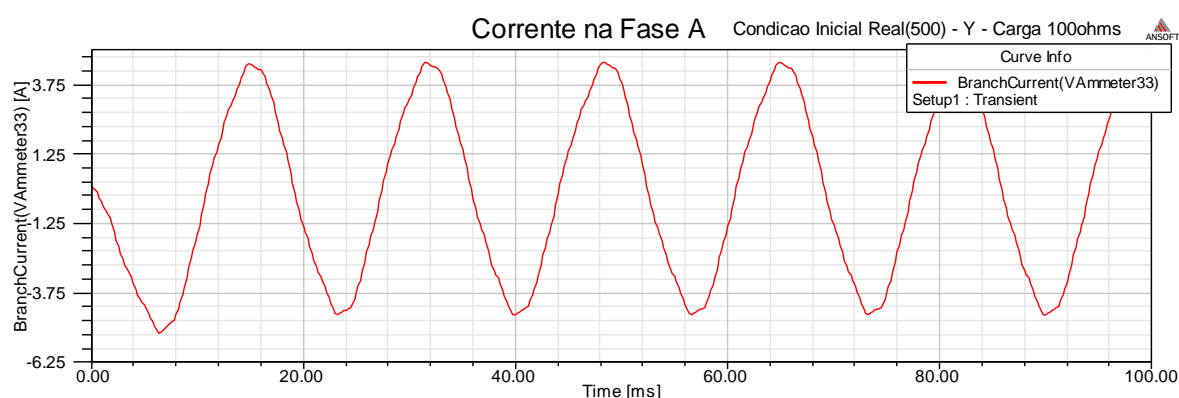
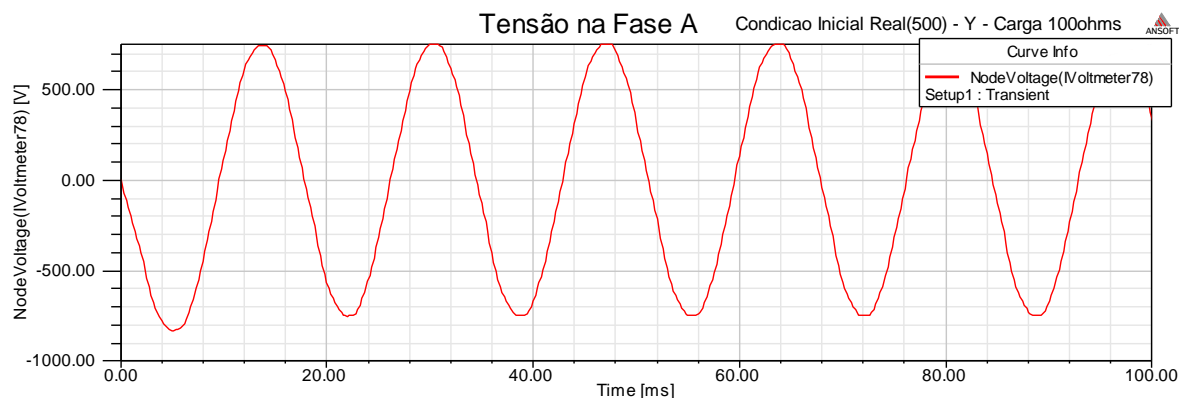


Figura 45: Tensão e corrente de linha para a máquina padrão conectada em estrela aterrado com $R=100\Omega$

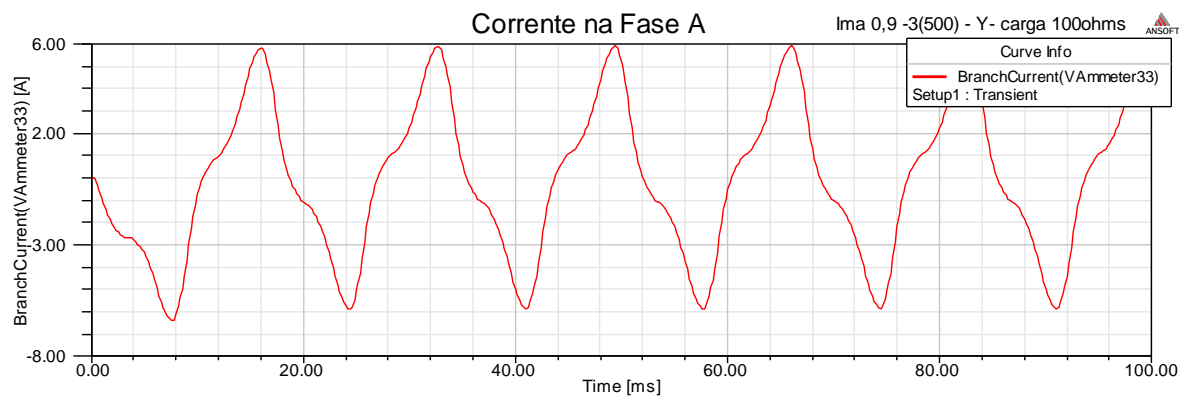
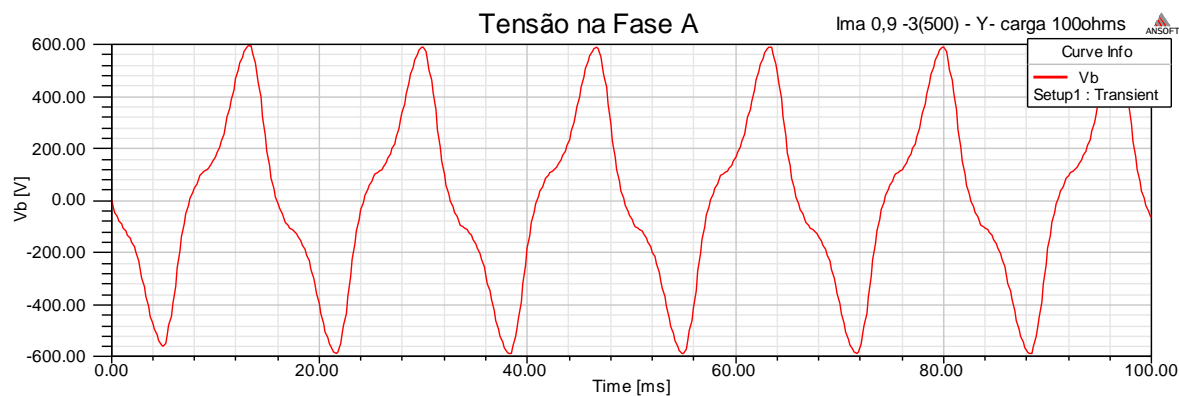


Figura 46: Tensão e corrente de linha para a máquina modificada conectada em estrela aterrada com $R=100\Omega$

Assim como para a conexão em delta, podemos perceber que a tensão e a corrente no caso da máquina padrão possuem a forma senoidal devido às características construtivas da máquina, que possui os enrolamentos distribuídos ao longo do entreferro.

Já no caso da máquina modificada, as tensões e correntes, apesar de não serem idealmente trapezoidais, sofrem uma menor influência dos harmônicos de 3ª ordem (frequência = 180Hz e período = 5,555ms), uma vez que eles circulam pelo condutor de neutro, conforme mostra a figura 47:

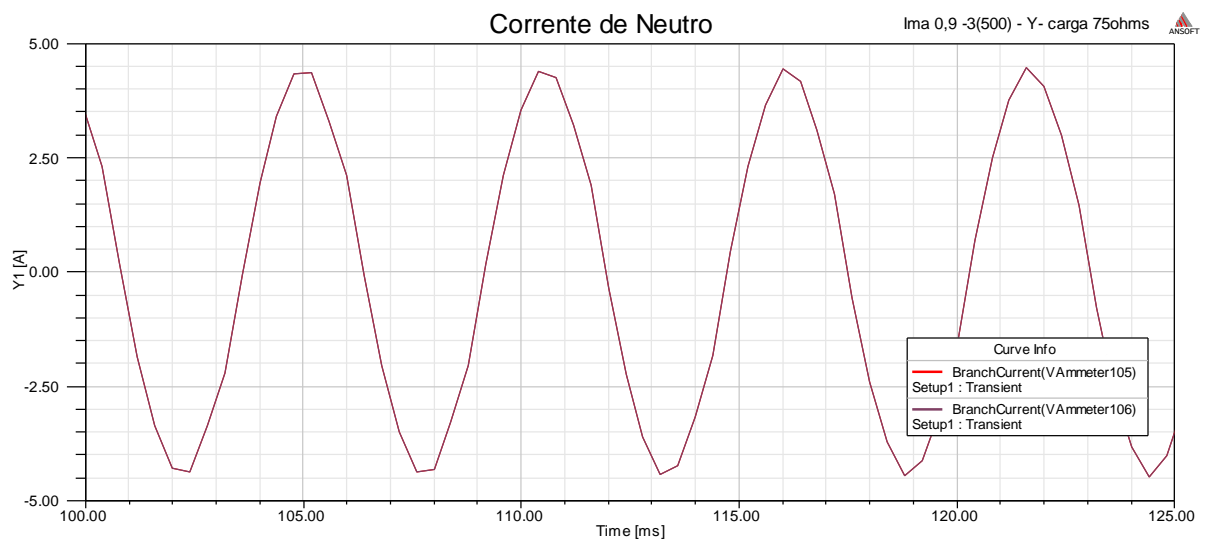


Figura 47: Harmônicos de 3ª ordem na corrente de neutro a máquina modificada conectada em estrela aterrada com $R=75 \Omega$

Assim como feito para conexão em delta, todos os dados de tensão e corrente obtidas nas simulações no Maxwell foram passados para o MATLAB e então, foram calculados os valores médio e RMS dessas grandezas, conforme mostra a tabela 4, onde:

- I_{LRMS} : é o valor RMS da corrente de linha da fase A
- V_{LRMS} : é o valor RMS da tensão de linha na fase A
- *Potência*: é o valor da potência fornecida pela máquina e é igual à $\sqrt{3} * I_{LRMS} * V_{LRMS}$

$I_{LRMS} * V_{LRMS}$

- *Diferença*: é a diferença percentual da potência de saída na comparação entre os modelos, sendo calculada como $\frac{PotênciaModeloModificado - PotênciaModeloPadrão}{PotênciaModeloPadrão} * 100$

Tabela 5: Valores de tensão, corrente e potência na conexão em estrela aterrado

CARGA (ohms)	MÁQUINA	IL RMS (A)	VL RMS (V)	POTÊNCIA (kW)	DIFERENÇA (%)
1000 -fp1	Modelo Padrão	0,5270	912,0000	0,8325	
	Modelo Modificado	0,5660	930,3000	0,9120	9,5555
700 -fp1	Modelo Padrão	0,7458	919,8000	1,1882	
	Modelo Modificado	0,7940	932,8000	1,2828	7,9676
500 -fp1	Modelo Padrão	1,0172	880,0000	1,5504	
	Modelo Modificado	1,0741	905,8000	1,6851	8,6896
300 -fp1	Modelo Padrão	1,4886	855,5000	2,2058	
	Modelo Modificado	1,6878	861,3000	2,5179	14,1504
200 -fp1	Modelo Padrão	2,0604	750,1000	2,6769	
	Modelo Modificado	2,1980	769,2000	2,9284	9,3947
150 -fp1	Modelo Padrão	2,5989	648,5319	2,9193	
	Modelo Modificado	2,8391	691,4000	3,3999	16,4633
100 -fp1	Modelo Padrão	3,0600	527,2000	2,7942	
	Modelo Modificado	3,3315	554,6300	3,2004	14,5371
75 - fp1	Modelo Padrão	3,3220	430,9200	2,4795	
	Modelo Modificado	3,5660	444,6600	2,7464	10,7677
30 - fp1	Modelo Padrão	3,6800	192,0500	1,2241	
	Modelo Modificado	3,9770	194,0000	1,3363	9,1680
10 - fp1	Modelo Padrão	3,6820	192,1200	1,2252	
	Modelo Modificado	3,9510	194,1300	1,3285	8,4285

Assim como no caso da conexão em delta, a análise da tabela 5 mostra que há um aumento de potência na máquina modificada quando comparada à máquina padrão. Este aumento varia entre aproximadamente 7,9% e 16,4% dentre os vários valores de carga, porém é sempre positivo, evidenciando que a máquina modificada apresentou maior potência que a máquina padrão.

De forma similar ao caso anterior, observa-se que conforme o valor da corrente aumenta, o valor da tensão gerada diminui. Isto é devido à ação desmagnetizante da corrente de armadura, conforme explicado no item anterior. Para observar este fenômeno, foi plotado no Maxwell um gráfico do módulo da densidade de fluxo no entreferro pela distância, que corresponde ao comprimento do entreferro. Foram analisados os casos da máquina modificada para carga igual a 30Ω e a 1000Ω , mostrados na figura 48.

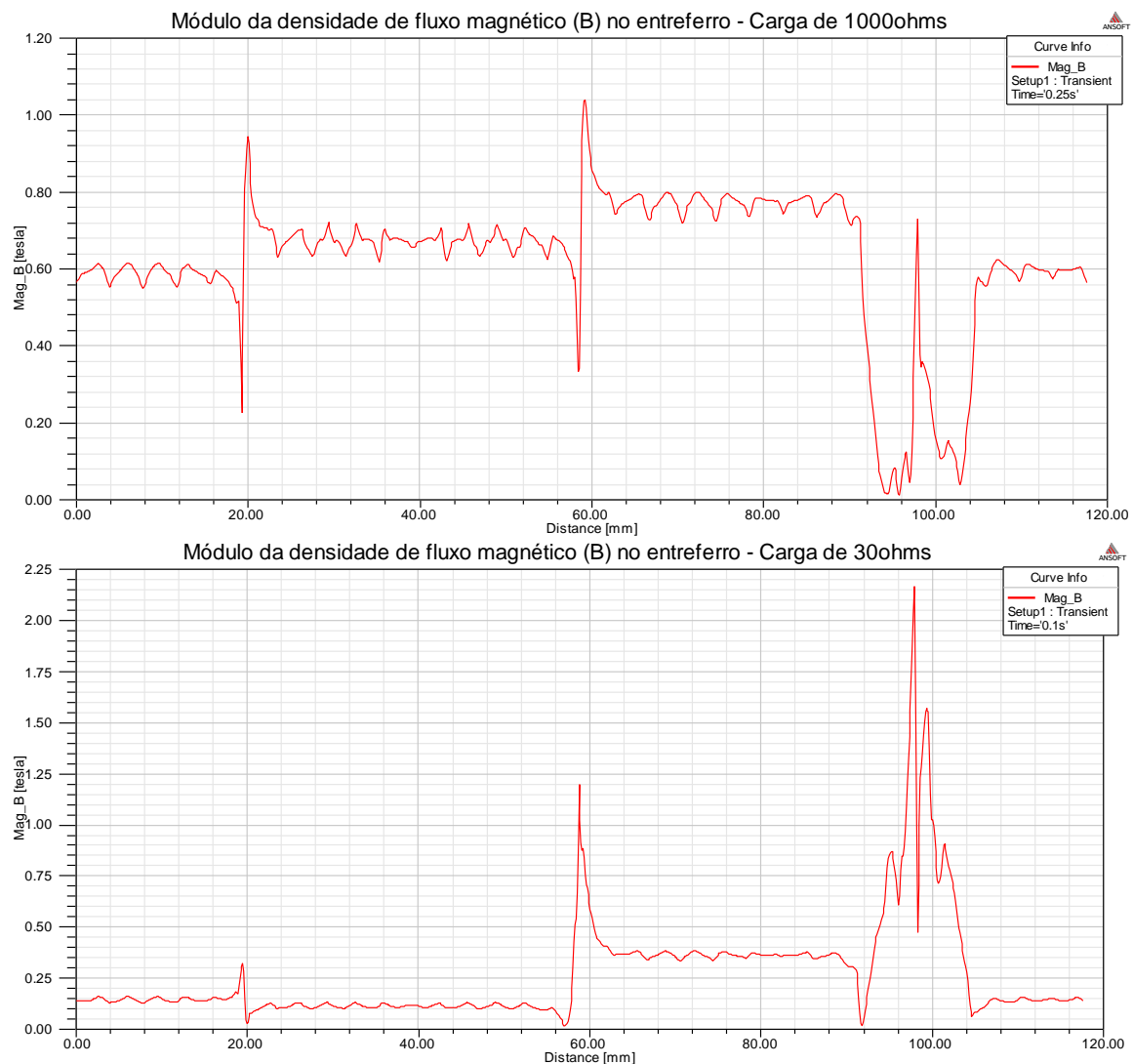


Figura 48: Módulo da densidade de fluxo magnético no entreferro para cargas de 1000Ω e 30Ω na conexão em estrela aterrado

De acordo com a tabela 5, quando a carga é de 1000Ω a corrente possui seu menor valor, 0,566A. Quando a carga é de 30Ω a corrente é 7 vezes maior, 3,977A. Paralelamente, observa-se na figura 48 que o módulo da densidade de fluxo no entreferro no primeiro caso é maior do que no segundo para toda a extensão do entreferro, comprovando a relação entre a corrente de armadura e a queda no valor da tensão gerada.

Novamente, deve-se ressaltar que nas posições de 18mm, 58mm e 98mm estão localizadas as ranhuras representadas no equivalente da máquina em meia circunferência (Figura 26.b). Essas ranhuras apresentam valores diferentes de corrente para um mesmo instante de tempo e conseqüentemente, apresentam diferentes valores de fluxo magnético.

A fim de se obter uma comparação mais realista em termos de rendimento, foi calculada também a potência no eixo da máquina fazendo o produto do torque (N.m) pela velocidade de rotação (rad/s) para cada instante de tempo simulado. Os resultados obtidos são mostrados na tabela 6. Neste cálculo adotou-se rendimento (η) como sendo igual a razão entre a potência obtida nos terminais da máquina (resultados mostrados na tabela 5) e a potência no eixo.

Tabela 6: Potência no eixo das máquinas e rendimento na conexão em estrela aterrado

CARGA (ohms)	MÁQUINA	Potência no eixo (N.m.rad/s)	Rendimento η (%)
1000 -fp1	Modelo Padrão	878,500	94,760
	Modelo Modificado	930,020	98,064
150 -fp1	Modelo Padrão	3000,680	97,289
	Modelo Modificado	3405,610	99,833
30 - fp1	Modelo Padrão	1299,300	94,214
	Modelo Modificado	1352,300	98,820
10 - fp1	Modelo Padrão	1345,540	91,058
	Modelo Modificado	1361,490	97,577

Podemos observar que a máquina modificada apresenta um rendimento maior quando comparada à máquina padrão, chegando a apresentar em alguns casos uma diferença de 6%. Os rendimentos de ambas as máquinas apresentam valores elevados devido ao fato do Maxwell não considerar a resistência das bobinas nos cálculos.

Novamente, foi verificado se os resultados obtidos eram alterados em função do fator de potência da carga, simulando casos em que as cargas tinham seus fatores de

potência modificados mantendo o mesmo módulo. Porém, mais uma vez nenhuma diferença significativa foi encontrada, conforme está exemplificado na figura 49.

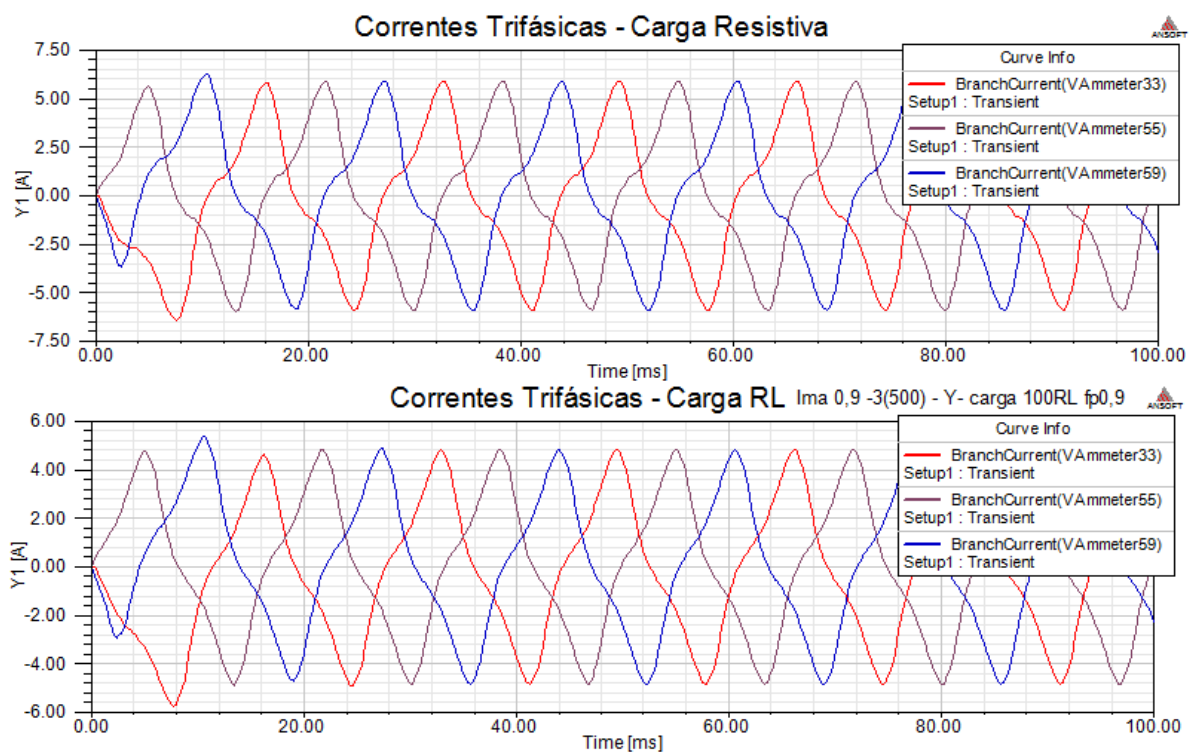


Figura 49: Formas de corrente das três fases para cargas Resistiva e RL de 100Ω na conexão estrela aterrado para a máquina modificada

A partir da tabela 5, pode-se analisar a relação da potência gerada em função da carga, conforme mostrado na figura seguinte.

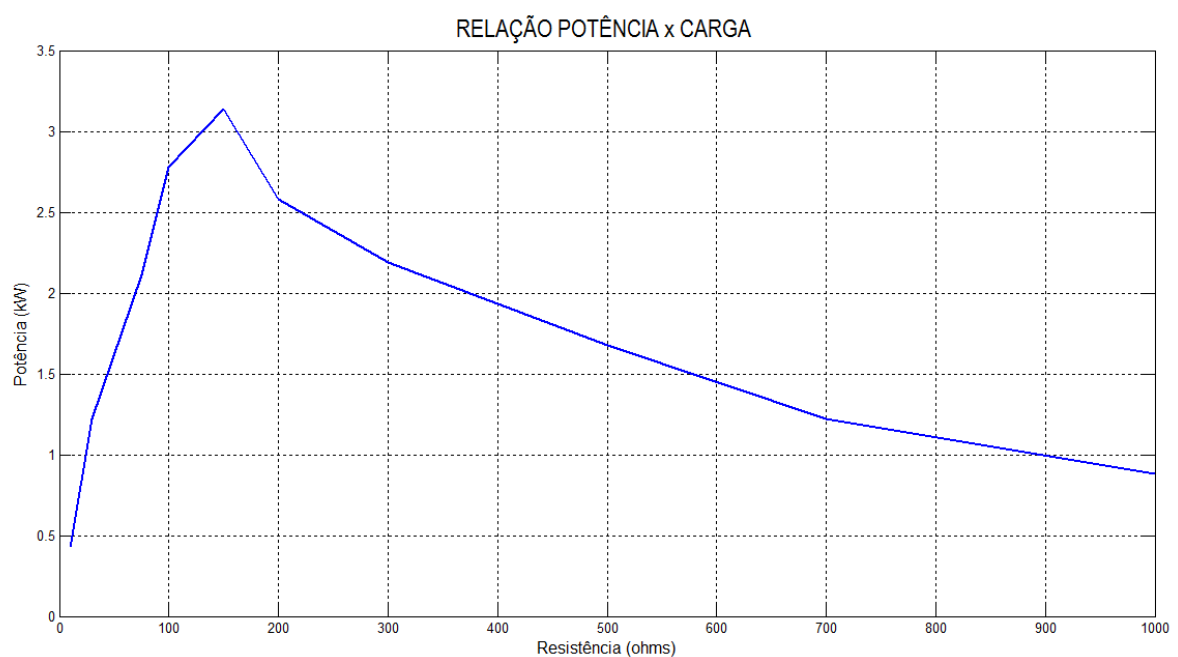


Figura 50: Relação Potência x Carga para conexão em estrela

Novamente a relação entre a potência fornecida pelo gerador e a carga resulta em uma curva de transferência de potência típica, tendo seu ponto de máxima potência quando o valor da carga é próximo de 150Ω .

5.3 Ligação em estrela não aterrado

Assim como nos casos anteriores, utilizou-se o programa Maxwell Circuit Editor da Ansoft para conectar as máquinas modeladas a um circuito externo formado por um banco de resistores em conexão estrela aterrado, conforme é mostrado na figura 51:

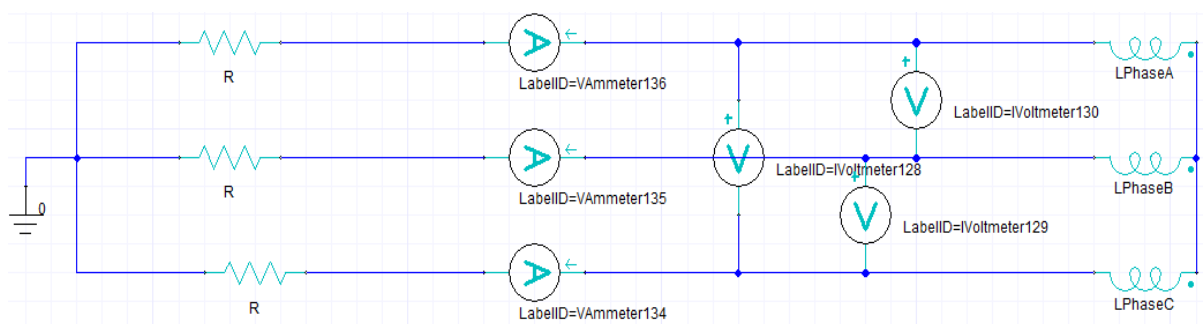


Figura 51: Circuito do GSIP conectado em estrela não aterrado

Os enrolamentos da máquina (LPhaseA, LPhaseB e LPhaseC) são conectados em estrela não aterrado respeitando a convenção do programa de forma a injetar potência no circuito.

Os elementos identificados com “R” formam o banco de resistores de igual valor conectados em estrela aterrado. Seus valores foram variados de 10Ω a 1000Ω e para cada caso foi simulado o funcionamento da máquina padrão e da máquina modificada.

Através dos amperímetros e voltmíetros instalados no circuito, pode-se observar na interface do Maxwell as curvas desejadas. As figuras 52 e 53 mostram os resultados da fase A, tensão e corrente de linha de ambos os modelos, para $R=100\Omega$:

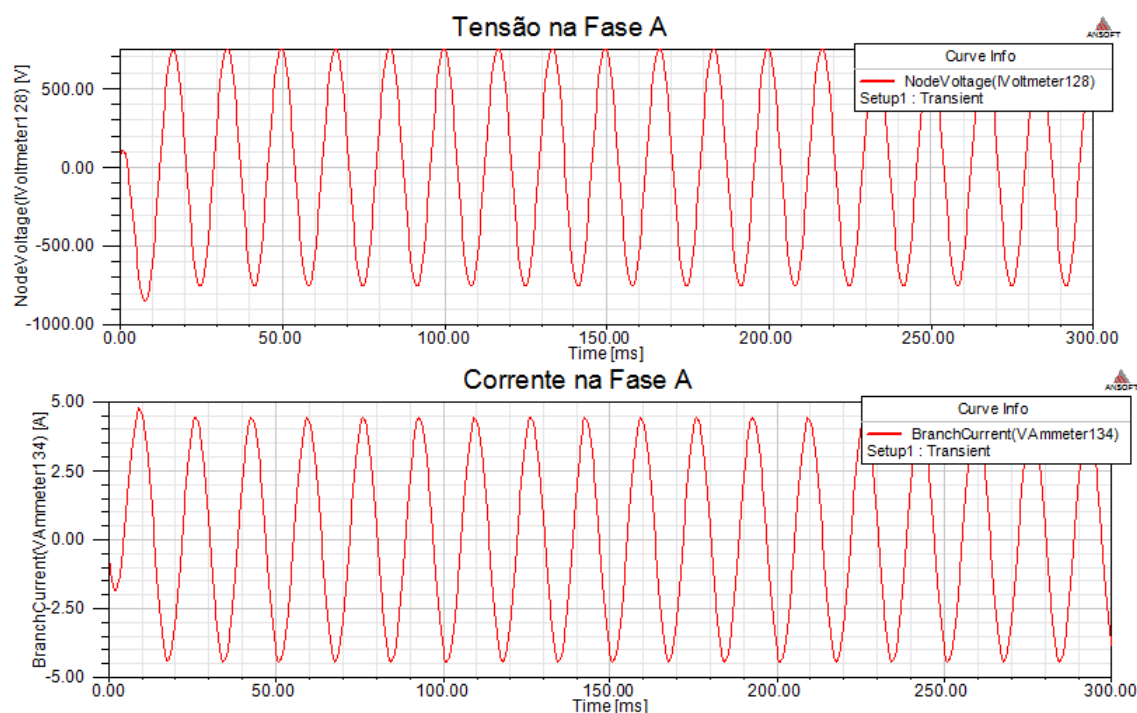


Figura 52: Tensão e corrente de linha para a máquina padrão conectada em estrela não aterrado com $R=100\ \Omega$

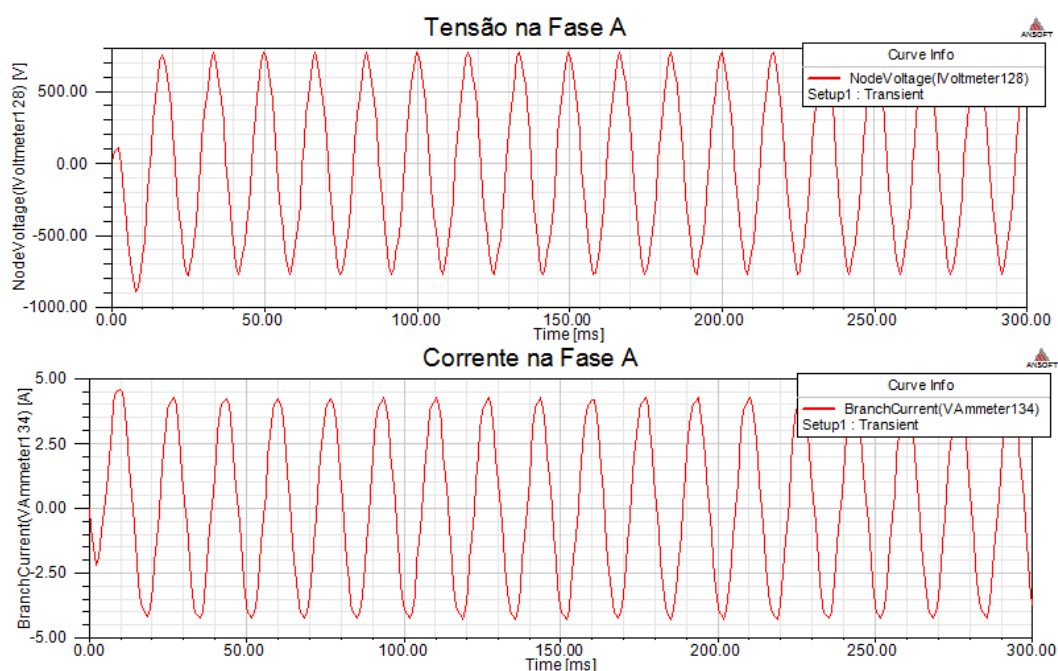


Figura 53: Tensão e corrente de linha para a máquina modificada conectada em estrela não aterrado com $R=100\ \Omega$

Assim como nas demais conexões, notamos que a tensão e a corrente no caso da máquina padrão possuem a forma senoidal devido aos seus enrolamentos distribuídos ao longo do entreferro.

Neste caso, a diferença se dá nos resultados da máquina modificada. Elas são senoidais e são iguais às formas de onda obtidas para máquina padrão, a menos de uma pequena diferença de amplitude. Isto é devido ao fato de, na conexão estrela não

aterrado, as distorções provocadas pelos harmônicos de 3ª ordem recaírem sobre as tensões de fase (tensões induzidas nos enrolamentos do estator da máquina), conforme é exemplificado na figura 54:

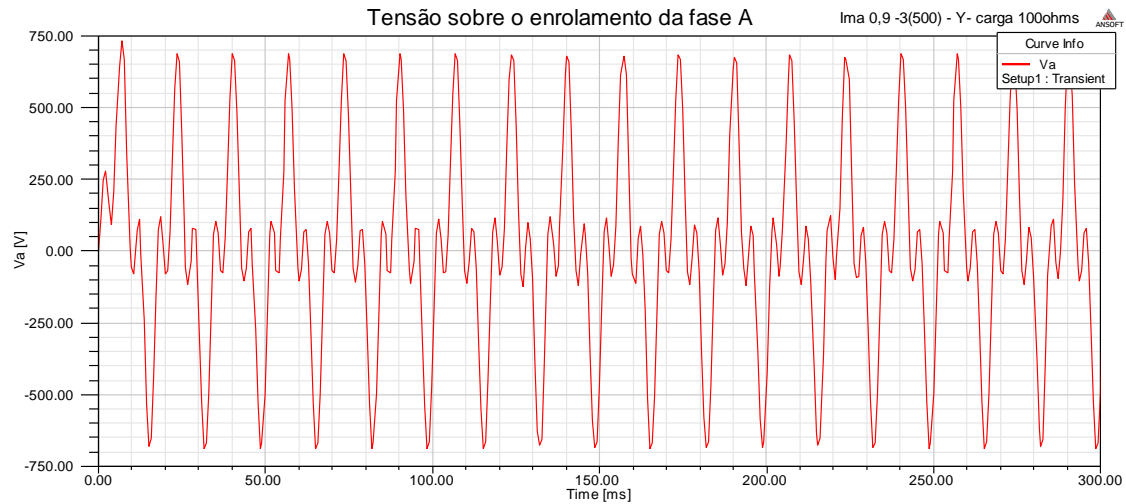


Figura 54: Tensão no enrolamento da fase A da máquina modificada conectada em estrela não aterrado para $R=100 \Omega$

Novamente, todos os dados de tensão e corrente obtidas nas simulações no Maxwell foram passados para o MATLAB onde foi possível calcular seus valores RMS e médio, conforme mostra a tabela 5, onde:

- I_{LRMS} : é o valor RMS da corrente de linha da fase A
- V_{LRMS} : é o valor RMS da tensão de linha na fase A
- *Potência*: é o valor da potência fornecida pela máquina e é igual à $\sqrt{3} * I_{LRMS} *$

V_{LRMS}

- *Diferença*: é a diferença percentual da potência de saída na comparação entre os

modelos, sendo calculada como $\frac{PotênciaModeloModificado - PotênciaModeloPadrão}{PotênciaModeloPadrão} * 100$

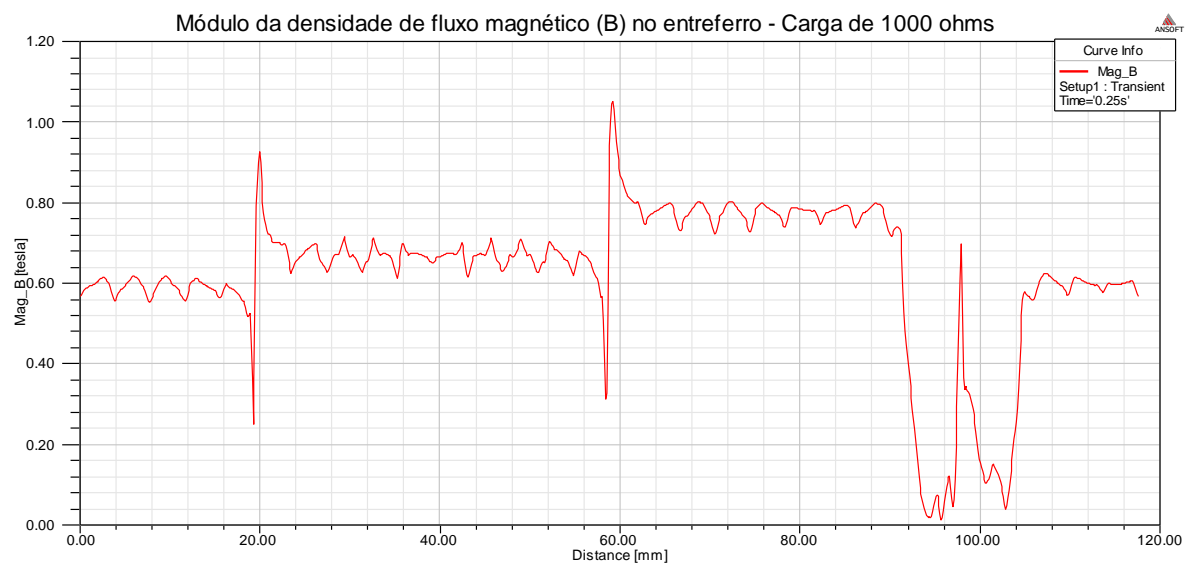
Tabela 7: Valores de tensão, corrente e potência na conexão em estrela não aterrado

CARGA (ohms)	MÁQUINA	IL RMS (A)	VL RMS (V)	POTÊNCIA (kW)	DIFERENÇA (%)
1000 -fp1	Modelo Padrão	0,5380	949,0000	0,8843	
	Modelo Modificado	0,5290	917,5000	0,8407	-4,9366
700 -fp1	Modelo Padrão	0,7620	924,3000	1,2199	
	Modelo Modificado	0,7580	902,7000	1,1851	-2,8496
500 -fp1	Modelo Padrão	1,0508	922,6000	1,6792	
	Modelo Modificado	1,0445	901,7000	1,6313	-2,8513
300 -fp1	Modelo Padrão	1,5400	819,7000	2,1864	
	Modelo Modificado	1,5100	771,2000	2,0170	-7,7496
200 -fp1	Modelo Padrão	2,1300	700,0000	2,5825	
	Modelo Modificado	1,9843	688,0000	2,3646	-8,4374
150 -fp1	Modelo Padrão	2,5127	687,2000	2,9908	
	Modelo Modificado	2,4900	637,1251	2,7728	-8,1244
100 -fp1	Modelo Padrão	3,0430	527,1315	2,7478	
	Modelo Modificado	2,9794	500,2000	2,5813	-7,0923
75 -fp1	Modelo Padrão	3,0636	397,8300	2,1110	
	Modelo Modificado	3,2000	416,2123	2,3069	9,2786
30 -fp1	Modelo Padrão	3,6756	192,1100	1,2230	
	Modelo Modificado	3,5190	182,2920	1,1111	-9,1534
10 -fp1	Modelo Padrão	3,7655	65,2220	0,4254	
	Modelo Modificado	3,6600	62,6000	0,3968	-6,7092

Diferentemente dos outros casos estudados, a análise da tabela mostra que há uma redução de potência na utilização da máquina modificada quando comparada à máquina padrão. Esta redução chega a até 9% e a diferença é negativa em praticamente todos os casos. Isto se dá devido à queda no valor das tensões e correntes da máquina modificada oriundas do fato do neutro estar isolado, conforme explicado anteriormente.

A única exceção para a diferença de potência ocorre para $R=75\Omega$. Neste caso em particular, as formas de onda resultantes foram assimétricas e apresentaram um valor médio muito alto. Portanto, seus resultados foram considerados inconclusivos.

Novamente, observa-se que conforme o valor da corrente aumenta, o valor da tensão gerada diminui, devido à ação desmagnetizante da corrente de armadura. Para comprovar este fenômeno, foi plotado no Maxwell o gráfico do módulo da densidade das linhas de fluxo no entreferro pela distância, que corresponde ao comprimento do entreferro, para os casos da máquina modificada para carga igual a 10Ω e a 1000Ω , mostrados na figura 55.



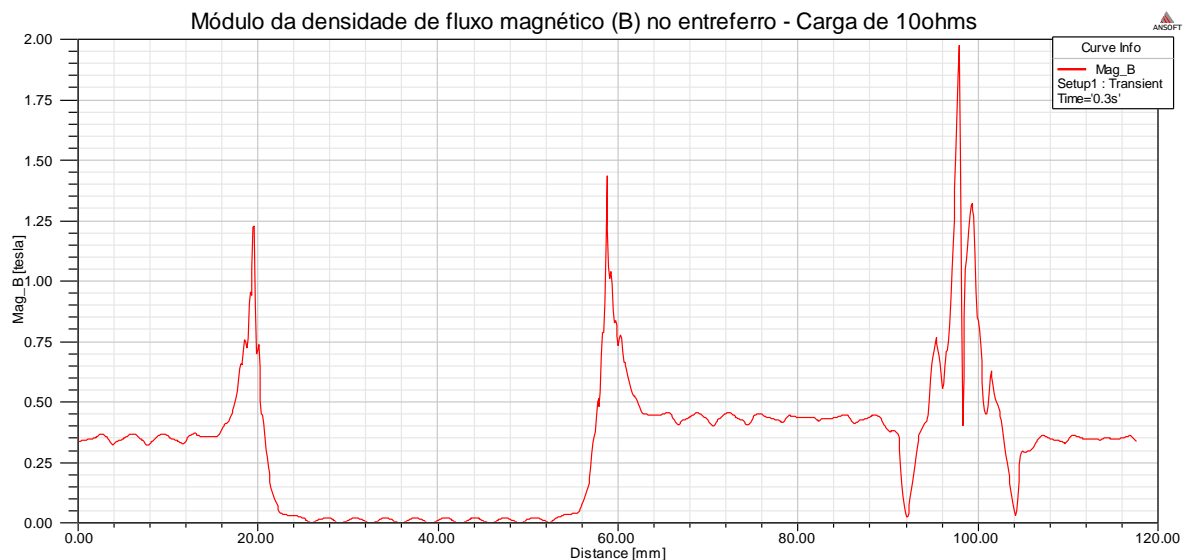


Figura 55: Módulo da densidade de fluxo no entreferro para cargas de 10Ω e 1000Ω na conexão em estrela não aterrado

De acordo com a tabela 7, quando a carga é de 1000Ω a corrente possui seu menor valor, $0,529A$. Quando a carga é de 10Ω a corrente é quase 7 vezes maior, $3,66A$. A figura 55 mostra que o módulo da densidade de fluxo no entreferro no primeiro caso é sempre maior do que no segundo caso, comprovando a relação entre a corrente de armadura e a queda no valor da tensão gerada.

Mais uma vez observa-se que nas posições de $18mm$, $58mm$ e $98mm$ estão localizadas as ranhuras representadas no equivalente da máquina em meia circunferência (Figura 26.b) e que elas apresentam diferentes valores de fluxo magnético., conforme explicado no item 5.2.

A fim de se obter uma comparação mais realista em termos de rendimento, foi calculada também a potência no eixo da máquina fazendo o produto do torque (N.m) pela velocidade de rotação (rad/s) para cada instante de tempo simulado. Os resultados obtidos são mostrados na tabela 8. Neste cálculo adotou-se rendimento (η) como sendo igual a razão entre a potência obtida nos terminais da máquina (resultados mostrados na tabela 7) e a potência no eixo.

Tabela 8: Potência no eixo das máquinas e rendimento na conexão em estrela não aterrado

CARGA (ohms)	MÁQUINA	Potência no eixo (N.m.rad/s)	Rendimento η (%)
1000 -fp1	Modelo Padrão	896,700	98,619
	Modelo Modificado	885,760	94,909
150 -fp1	Modelo Padrão	3007,400	99,447
	Modelo Modificado	3008,700	91,328
30 - fp1	Modelo Padrão	1251,700	97,710
	Modelo Modificado	1271,700	87,370
10 - fp1	Modelo Padrão	434,360	97,933
	Modelo Modificado	469,710	84,486

Diferentemente dos resultados encontrados para as conexões anteriores, a tabela 8 mostra que a máquina modificada apresenta um rendimento menor que o da máquina padrão, ratificando os resultados mostrados na tabela 7.

Assim como para as demais conexões, foram simulados casos em que as cargas tinham seus fatores de potência alterados mantendo o mesmo módulo. Porém, novamente nenhuma diferença relevante foi observada, conforme está exemplificado na figura 56.

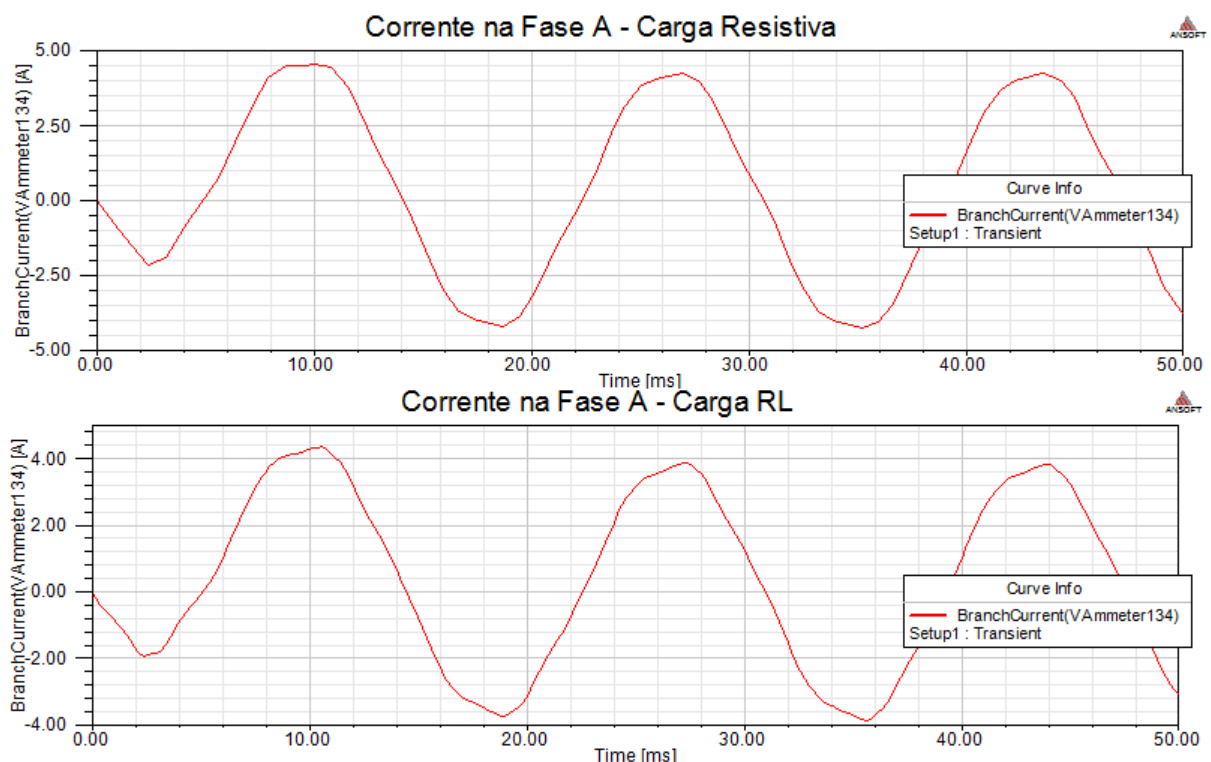


Figura 56: Formas de corrente da fase A para cargas Resistiva e RL de 100Ω na conexão estrela não aterrado para máquina modificada

A partir da tabela 7, pode-se analisar a relação da potência gerada em função da carga, conforme mostrado na figura seguinte:

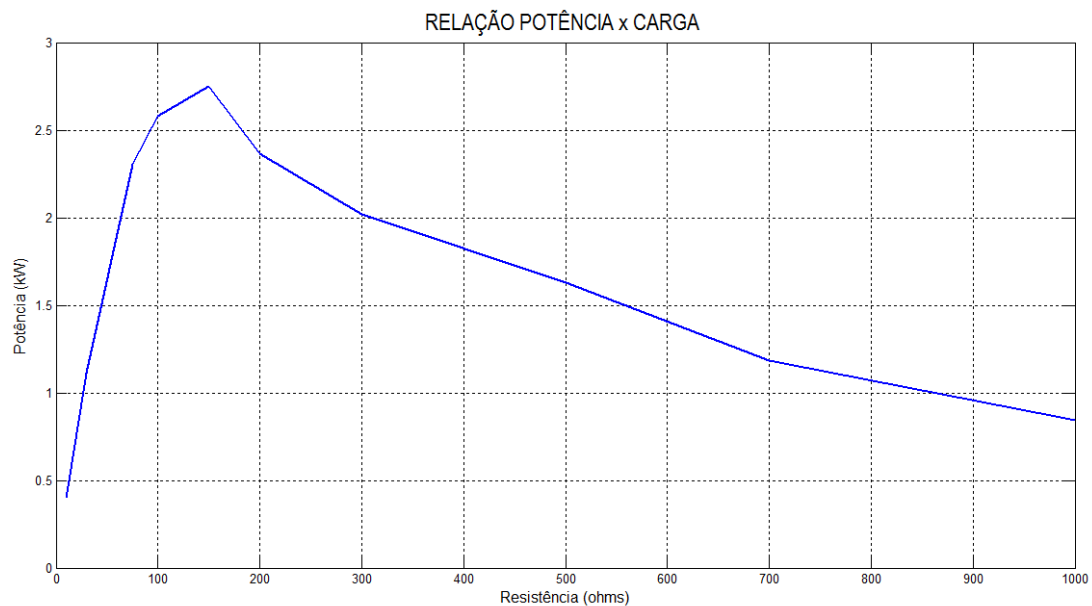


Figura 57: Relação Potência x Carga para conexão em estrela não aterrado

Novamente a relação entre a potência fornecida pelo gerador e a carga resulta em uma curva de transferência de potência típica, tendo seu ponto de máxima potência quando o valor da carga é próximo de 150Ω .

5.4 Comparação entre as três formas de conexão

A fim de comparar os resultados obtidos nos itens anteriores, as relações Potência x Carga dos três tipos de conexão utilizados foram plotadas em um mesmo gráfico, conforme mostrado na figura 58.

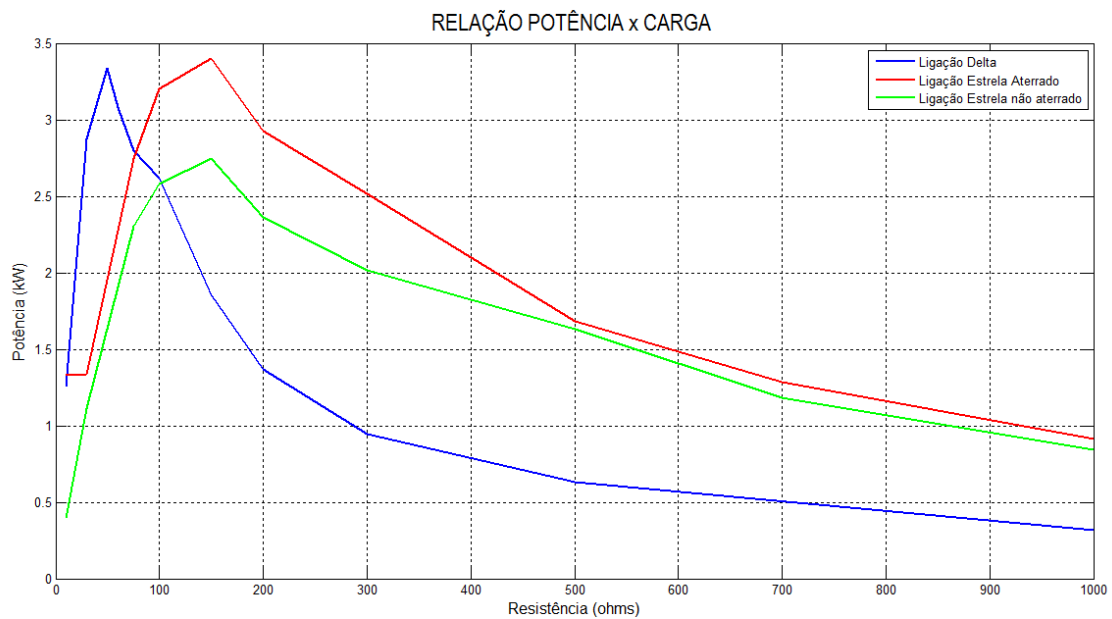


Figura 58: Relação Potência x Carga da ligação delta, estrela e estrela não aterrado

Nota-se que o ponto de máxima potência é o mesmo para as conexões estrela aterrado e não aterrado e ocorre quando $R=150\Omega$. Porém, para conexão em delta, ele ocorre para $R=50\Omega$. Este ponto é função da tensão e da impedância equivalente vista pela carga e ocorre quando a impedância da carga é igual a impedância do equivalente Thévenin do circuito da fonte [7]. No caso dos enrolamentos conectados em delta, como as cargas estão conectadas em estrela, isso correrá quando a carga for igual à um terço do equivalente da fonte, ou seja, $R=50\Omega$.

Percebemos também, que as maiores potências foram alcançadas para a conexão tipo estrela aterrado. Isto ocorre pois neste tipo de conexão, os harmônicos de 3ª ordem estão presentes no neutro e não causam distorções nas tensões induzidas pela máquina, fazendo com que ela possua maiores valores RMS de tensão e corrente e, consequentemente, maior potência.

Além disso, ao compararmos os resultados obtidos para as conexões delta e estrela aterrado, notamos que no primeiro caso, o desempenho da máquina em termos de potência é prejudicado devido à presença de correntes que circulam nos enrolamentos conectados em delta.

Este resultado é confirmado através da análise das tabelas 4, 6 e 8, que nos permite concluir que a conexão estrela aterrado apresentou maior rendimento que as demais conexões, tanto em números absolutos, quanto em ganho quando comparada à máquina padrão.

6 Conclusões e Trabalhos Futuros

6.1 Considerações Finais

Esse trabalho teve como parte de seu objetivo mostrar os fatores que influenciam na forma de onda da tensão gerada pela máquina, o que foi feito com sucesso.

No capítulo 3 “Modelagem do Gerador em estudo”, foram analisados os efeitos de cada mudança no projeto da máquina. Pôde-se observar que todas as ações, que resultaram de alguma forma na mudança da forma de onda senoidal para uma forma trapezoidal, tiveram como princípio básico buscar que os enrolamentos do estator fossem mais concentrados ao invés de distribuídos, confirmando as expectativas teóricas mostradas no capítulo 2. Para a configuração de ímãs utilizada, a diminuição do número de pólos permitiu que a tensão, inicialmente senoidal, tomasse uma forma trapezoidal. Em seguida, a diminuição no número de ranhuras e da dimensão das mesmas causou um aumento no tempo de subida e uma redução nas oscilações no pico de tensão. Por fim, o aumento no comprimento do ímã resultou em um maior valor eficaz da onda gerada, ou seja, reduziu o tempo no qual a tensão era igual a zero.

O segundo objetivo consistiu em mostrar o ganho de potência que pode ser obtido quando da utilização de máquinas com tensões não senoidais ao invés da geração senoidal padrão. Este objetivo também foi alcançado.

No capítulo 4 “Comparação dos modelos”, foram simulados os funcionamentos de ambas as máquinas em diferentes situações de carga e em diferentes formas de conexão. Conforme se pretendia mostrar, a máquina modificada apresentou maiores valores de tensão e corrente e, consequentemente de potência, para todos os valores de carga nas conexões delta e estrela aterrado. Por esse motivo, foi possível também observar a influência dos harmônicos sobre os resultados obtidos. A conexão estrela aterrado apresentou maiores valores de potência e de rendimento do que a conexão em delta, exatamente pela influência dos harmônicos de 3ª ordem, que causam distorções nas tensões geradas na ausência do condutor de neutro.

Na conexão estrela não aterrado, a máquina modificada obteve menores valores de potência na comparação com a máquina original em todos os cenários de carga estudados. Isto mostrou que, quando há uma grande distorção na forma de onda da

tensão devido à presença de harmônicos, esta perde a forma trapezoidal concebida originalmente e deixa de ser vantajosa em relação à tensão senoidal.

6.2 Trabalhos Futuros

Nas simulações feitas neste trabalho, a máquina com tensão trapezoidal foi conectada diretamente à carga. Porém, em uma aplicação real seria necessário adequar a tensão gerada às exigências da rede elétrica.

Por esta razão, seria interessante que em um futuro trabalho fosse realizado o projeto de um retificador com controle otimizado, de forma que se possa extrair a maior potência possível de uma máquina trapezoidal, e então, conectar os modelos de máquina apresentados aqui a diferentes modelos de carga que simulem uma operação real, a fim de compará-los.

7 Referências Bibliográficas

- [1] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, Plano Decenal de Expansão de Energia 2020, Ministério de Minas e Energia, 2010.
- [2] CARLSON, R.; VOLTOLINI, H. Geração de Energia Eólica – Tecnologias Atuais e Futuras, GRUCAD-EEL-CTC-UFSC / WEG MÁQUINAS, 2010.
- [3] FITZGERALD, A. E.; Kingsley, Charles; Umans, Stephen D. Máquinas Elétricas. 6ª ed. London, Bookman, 2006.
- [4] BIM, E. Máquinas Elétricas e Acionamento, 1ª ed. Elsevier, 2009
- [5] FERREIRA, A.P. "Projeto e Seleção de Materiais Magnéticos Permanentes". Instituto Politécnico De Bragança, 2011.
- [6] HENDERSHOT, J.R.; MILLER T. Design of Brushless Permanent-Magnet Motors, 1ª ed. Oxford, Magna Physics Publications, 1994.
- [7] ALEXANDER, C.K.; SADIKU, M.N.O.; Fundamentos de Circuitos Elétricos. 3ª ed, McGraw Hill, 2008
- [8] MONTEIRO, T.M. "Máquina Síncrona Com Tensão Não-Senoidal Para Aplicações Em Fontes Alternativas" *Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro*, Outubro, 2012.

